



Routage géographique multi-chemin basé sur l'intelligence d'essaim pour réseaux de capteurs et d'actionneurs sans fil: Application aux Smart Grids

Mouna Rekik

► To cite this version:

Mouna Rekik. Routage géographique multi-chemin basé sur l'intelligence d'essaim pour réseaux de capteurs et d'actionneurs sans fil: Application aux Smart Grids. Réseaux et télécommunications [cs.NI]. Université Lille 1; Université de Sfax, 2016. Français. NNT: . tel-01370723

HAL Id: tel-01370723

<https://inria.hal.science/tel-01370723>

Submitted on 23 Sep 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ LILLE 1 - SCIENCES ET TECHNOLOGIES
UNIVERSITÉ DE SFAX - ÉCOLE NATIONALE D'INGÉNIEUR DE SFAX

École doctorale **Sciences et Technologies** Ecole Nationale d'ingénieur de Sfax

Unité de recherche Inria Lille–Nord Europe

Thèse présentée par **Mouna REKIK**

Soutenue le **26 juillet 2016**

En vue de l'obtention du grade de docteur de l'Université Lille 1 - Sciences et Technologies et
de l'Université de Sfax - Ecole Nationale d'Ingénieur de Sfax

Spécialité **Informatique**

**Routage géographique multi-chemin
basé sur l'intelligence d'essaim pour
réseaux de capteurs et d'actionneurs
sans fil : Application aux Smart Grids**

Thèse dirigée par **Nathalie MITTON**
Zied CHTOUROU

Composition du jury

<i>Rapporteurs</i>	Hakima CHAOUCHI	Professeure - Institut Télécom SudParis
	Lamia CHAARI FOURATI	MCF - Institut Supérieur d'In- formatique et de Multimédia de Sfax
<i>Examineurs</i>	Aline VIANA	chargée de recherche HDR - Inria Saclay - Ile de France
	Mohamed JMAIEL	Professeur - Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax
<i>Directeurs de thèse</i>	Nathalie MITTON	chargée de recherche HDR - Inria Lille – Nord Europe
	Zied CHTOUROU	Professeur - Académie Mili- taire

UNIVERSITÉ LILLE 1 - SCIENCES ET TECHNOLOGIES
UNIVERSITÉ DE SFAX - ECOLE NATIONALE D'INGÉNIEUR DE SFAX

Doctoral School Sciences et Technologies Ecole Nationale d'ingénieur de Sfax
University Department Inria Lille–Nord Europe

Thesis defended by **Mouna REKIK**

Defended on **26th July, 2016**

In order to become Doctor from Université Lille 1 - Sciences et Technologies and from
Université de Sfax - Ecole Nationale d'Ingénieur de Sfax

Speciality **informatique**

Thesis Title

**Geographical multipath routing
based on swarm intelligence for
wireless sensors and actuators
networks: Application to Smart Grids**

Thesis supervised by Nathalie MITTON
Zied CHTOUROU

Committee members

<i>Referees</i>	Hakima CHAOUCHI	Professor at Institut Télécom SudParis
	Lamia CHAARI FOURATI	Associate Professor at Institut Supérieur d'Informatique et de Multimédia de Sfax
<i>Examiners</i>	Aline VIANA	HDR at Inria Saclay - Ile de France
	Mohamed JMAIEL	Professor at Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax
<i>Supervisors</i>	Nathalie MITTON	HDR at Inria Lille – Nord Eu- rope
	Zied CHTOUROU	Professor at Académie Mili- taire

Cette thèse a été préparée dans les laboratoires suivants.

Inria Lille–Nord Europe

Villeneuve-d'Ascq, France

Site <http://www.inria.fr/lille>



CMERP

Sfax, Tunisie

Site <http://www.cmerp.net/>



ROUTAGE GÉOGRAPHIQUE MULTI-CHEMIN BASÉ SUR L'INTELLIGENCE D'ESSAIM POUR RÉSEAUX DE CAPTEURS ET D'ACTIONNEURS SANS FIL : APPLICATION AUX SMART GRIDS**Résumé**

Le concept de Smart Grid devrait jouer un rôle primordial dans la quête d'une meilleure gestion de l'énergie électrique dans un contexte énergétique mondial de plus en plus critique. En rassemblant les ressources connectées au réseau électrique conventionnel et une infrastructure de communication, le Smart Grid permet une gestion intelligente de l'énergie électrique. La mise en œuvre des Smart Grids devrait engendrer la mise en place d'une infrastructure de communication permettant l'échange des données entre les différentes entités connectées à ces réseaux. Cette thèse se positionne dans le contexte des réseaux de capteurs et d'actionneurs sans fils appliqués dans les réseaux d'électricité intelligents. A travers cette thèse, nous avons proposé un protocole de routage des données sur le réseau de communication au niveau réseau de distribution. Dans un premier temps, nous avons proposé un nouveau protocole de routage géographique basé sur l'intelligence d'essaim pour les réseaux de capteurs et d'actionneurs sans fil. Le protocole utilise le routage géographique comme mécanisme principal de routage de données, et utilise un mécanisme basé sur l'optimisation par colonies de fourmis pour contourner les vides de communication et créer du multi-chemin autour de ces zones vides. Les performances du protocole ont été validées à travers des simulations. En comparant les résultats à l'état de l'art, le protocole proposé permet d'améliorer les performances du réseau en termes de taux de livraison des données, temps de réception des données et coût de livraison. Dans un second temps, nous avons proposé l'utilisation du protocole proposé comme protocole de routage dans les réseaux de voisinages (NAN) sans fil du Smart Grid. Le protocole proposé permet d'assurer tous les types de paradigme de communication, en particulier la communication Point-à-Point tout en offrant une évolutivité et des capacités d'auto-guérison. La faisabilité et l'applicabilité du protocole dans les NANs a été confirmée à travers des simulations, en utilisant des paramètres définis par le NIST (National Institute of Standards and Technology), pour valider les solutions proposées pour le Smart Grid. Enfin, dans un troisième temps, nous nous sommes concentrés sur les qualités de service (QoS) requises par les applications et services utilisant le NAN. Nous avons, ainsi, ajouté un modèle de QoS au protocole de routage proposé pour tenir compte de ces exigences. Les performances du nouveau protocole ont été validées à travers des simulations. Les résultats ont montré que le protocole permet de satisfaire les exigences les plus contraintes en termes de fiabilité et de délai de réception des données.

Mots clés : réseaux de capteurs et d'actionneurs sans fil, smart grid, neighborhood area network, protocole de routage, routage géographique, optimisation par colonies de fourmis

GEOGRAPHICAL MULTIPATH ROUTING BASED ON SWARM INTELLIGENCE FOR WIRELESS SENSORS AND ACTUATORS NETWORKS: APPLICATION TO SMART GRIDS**Abstract**

The Smart Grid concept should play a key role in the quest for better management of electrical energy in the global energy situation increasingly critical. By bringing together the resources connected to the conventional power grid and communications infrastructure, the Smart Grid enables intelligent management of electrical energy. The implementation of Smart Grids should lead the implementation of a communication infrastructure for data exchange between the various entities connected to these networks. This thesis is positioned in the context of wireless sensors and actuators networks in smart grids. Through this work, we have proposed a data routing protocol for the communication network to the distribution network level. First, we proposed a new geographical routing protocol based on swarm intelligence for wireless sensors and actuators networks. The protocol uses the geographic routing as a main data routing mechanism, and uses a recovery mechanism based on ant colony optimization to bypass communication voids and to create multi-way around these voids. The protocol performance was validated through simulations. By comparing the results to the state of the art, the proposed protocol improve network performances in terms of data delivery rate, end-to-end delay and delivery cost. Secondly, we proposed the use of the protocol proposed as the routing protocol in wireless neighborhood area networks (NANs) Smart Grid. The proposed protocol ensures all communication paradigm types, especially Point-to-Point communication while providing scalability and self-healing capabilities. The feasibility and applicability of the protocol in NANs was confirmed through simulations using parameters defined by NIST (National Institute of Standards and Technology) to validate the proposed solutions for the smart grid. Finally, we focused on the qualities of service (QoS) required by applications and services using NAN. We have thus added a QoS model to the proposed routing protocol to take account of NAN's communication requirements. The performance of the new protocol was validated through simulations. The results showed that the protocol can satisfy the most severe requirements in terms of reliability and end-to-end delay.

Keywords: wireless sensor and actuator network, smart grid, neighborhood area network, routing protocol, geographic routing, ant colony optimization

Acronymes

A | C | D | E | F | G | H | I | L | M | N | P | Q | R | S | T | V | W

A

ACO Ant Colony Optimization. 4, 15, 17, 18, 20, 22, 24, 27, 39, 45, 47

AGC Automatic Generation Control. 53

AMI Advanced Metering Infrastructure. 53, 60, 65, 80, 81

AMR Advanced Meter Reading. 53

C

CI compteur intelligent. 3, 61, 65, 72, 76, 79, 81, 87, 99, 100

CoT classe de trafic. 110, 112, 114–116, 119, 120

CPL courant porteur en ligne. 61, 63

D

DA distribution automation. 67, 75, 80, 101, 104, 105

DAP data aggregation point. 62, 76, 78, 81, 87, 99

DER distributed energy resource. 68, 73, 74

DERS distributed energy resources and storage. 68, 73–75, 80, 104, 144

DODAG Destination Oriented Direct Acyclic graph. 82

DOE U.S. department of energy. 65, 104, 106

DR demand response. 60, 66, 104

DSM demand-side management. 66, 75, 80

E

EMS Energy Management System. 52

F

FAN field area network. 62, 99, 100

G

GPSR Greedy Perimeter Stateless Routing. 84, 145

GRACO geographic **GR**eedy forwarding with **ACO** based recovery strategy. 20, 22, 86–88, 90, 92, 93, 97, 107, 110, 112, 115, 122, 125

H

HAN home area network. 60, 62, 68

I

IETF Internet Engineering Task Force. 81, 82

L

LLN Low Power and Lossy Networks. 79, 81, 82

M

MDMS Meter Data Management System. 99

MP2P multipoint-à-point. 72, 74, 75, 80, 81, 85–87, 98, 99

N

NAN neighborhood area network. 3–5, 47, 61, 64, 68, 69, 71, 72, 74, 76–82, 85–90, 93, 94, 97–103, 107, 108, 115, 128–130

NIST National Institute of Standards and Technology. 55, 65, 86–88, 94, 128

P

P2MP point-à-multipoint. 72, 74, 75, 80, 81, 85, 87, 98, 100

P2P point-à-point. 72, 74, 75, 79, 80, 85–87, 90, 98, 101

Q

QoS qualité de service. xvii, 3, 5, 97, 107, 108, 110, 112, 115, 122–125, 129

R

RCSF réseau de capteurs sans fil. 9, 11, 12, 17

RPL Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks. 82

RTU Remote Terminal Unit. 52

S

SCADA Supervisory Control and Data Acquisition System. 52, 67

SG Smart Grid. 1–5, 47, 51, 54, 55, 57–59, 63, 67, 68, 73, 79, 81, 86, 89, 97, 98, 101, 106, 115, 127, 128, 130

SGAM smart grid architectural model. 56, 57, 60

T

TIC technologies de l’information et de la communication. 1, 2

V

VE véhicule électrique. 61, 67, 72, 78

VPP Pirtual Power Plant. xvi, 73, 74, 76

W

WAN wide area network. 64, 69

WASA wide area situational awareness. 68

Sommaire

Résumé	iv
Acronymes	vii
Sommaire	xi
Liste des tableaux	xiii
Table des figures	xv
Introduction	3
Contexte	3
Thèse	5
Structure de la thèse	6
Notations, modèles et hypothèses	7
 I Routage géographique avec garantie de livraison dans les réseaux de capteurs sans fil	 9
État de l’art : Routage Géographique	13
Le routage géographique	13
Mécanismes de récupération	16
Conclusion	20
 GRACO	 23
Motivation	23
Optimisation par colonie de fourmis	24
GRACO	26

Évaluation des performances	39
Discussion sur l'utilisation de mémoire	51
Conclusion	52
 II Routage géographique dans les réseaux de capteurs et ac-	
tionneurs sans fil dans les smart grids	55
 Smart Grids : Les réseaux électriques intelligents	59
Réseau d'électricité conventionnel	59
Réseau d'électricité intelligent : le smart grid	62
Architecture du Smart Grid	63
Réseaux de communication du Smart Grid	66
Les nouvelles applications introduites par Smart Grid	72
Conclusion	76
 Évaluation de GRACO dans NAN	79
Exigences de la communication pour les NANs	79
Routage dans les réseaux NAN	88
Évaluation des performances de GRACO dans le contexte du SG-NAN	94
Conclusion	102
 QoS-GRACO	105
Exigences en QoS des applications du NAN	105
QoS-GRACO	115
Simulations et résultats	123
Conclusion	130
 Conclusion et Perspectives	135
Conclusion	135
Perspectives	137
 Liste des publications	141
 Bibliographie	143
 Table des matières	153

Liste des tableaux

1	Les caractéristiques des techniques de récupération	19
2	Paramètres de simulation	42
3	Les schémas de communication exigés par les applications du NAN [1]	84
4	Les exigences du NAN en termes de délai et fiabilité [1]	87
5	Paramètres du canal pour trois environnements à 2.4 GHz[2]	96
6	Paramètres de simulation	98
7	Les classes de trafic	117
8	Paramètres de simulation	124

Table des figures

1	Stratégies de routage géographique	14
2	Le nœud K n'a pas de voisins dans sa zone de progrès positif vers D . Malgré qu'il existe un chemin vers D (marqué en pointillés), le nœud K ne peut plus faire progresser le paquet en utilisant le routage glouton.	16
3	effet de coupure d'une piste	25
4	Phase gloutonne : <i>ph-assisted greedy forwarding</i>	27
5	Les différentes zones de U par rapport à la destination D	29
6	Illustration de α , β et θ	30
7	$Fant$ est considérée par le nœud effectuant le meilleur progrès vers la destination dans chaque zone de régression : N_1 de la $zone_2(K)$, N_3 de la $zone_4(K)$ et N_5 de la $zone_3(K)$	32
8	Un exemple d'une $Fant$ à la recherche d'un itinéraire autour d'un vide	34
9	La $Bant$ retourne au nœud bloquant	36
10	Multiples récupérations pour une destination D	38
11	Détection et gestion d'une boucle	40
12	Gestion des boucles	41
13	Coût de transmission - couche MAC idéale	44
14	Coût de transmission - 802.15.4 MAC	46
15	Longueur moyenne des routes	47
16	Nombre de routes	47
17	Le délai de bout-en-bout en fonction du nombre de paquets de données envoyés - couche MAC parfaite	49
18	Le délai de bout-en-bout en fonction du nombre de paquets de données envoyés - couche MAC IEEE 802.15.4	49
19	Le taux de livraison en fonction du nombre de paquets de données envoyés - couche MAC idéale	50

20	Taux de livraison en fonction du nombre de paquets de données envoyés - couche MAC IEEE 802.15.4	51
21	Réseau d'électricité conventionnel	60
22	Smart Grid	64
23	SGAM [3]	65
24	Mapping des SGCNs sur la couche communication du SGAM . .	67
25	HAN [4]	68
26	AMI	70
27	FAN	70
28	Illustration d'un Pirtual Power Plant (VPP). Les entités entourées de cercles rouges ont décidé de rejoindre le VPP.	81
29	VPP à contrôle centralisé	82
30	VPP à contrôle hiérarchique	82
31	VPP à contrôle entièrement distribué	82
32	Un exemple de perte de connexion en raison d'obstacles physiques	85
33	La communication P2P en utilisant le routage RPL	91
34	Face routing	92
35	Étapes d'extension d'un réseau NAN dans une région urbaine . .	99
36	Longueur moyenne des routes en fonction de la densité du réseau	100
37	Délai de bout-en-btou en fonction de la densité du réseau	101
38	Taux de livraison en fonction de la densité du réseau	101
39	Les applications du NAN	106
40	trafic MP2P	108
41	Trafic P2MP	109
42	Trafic P2P	110
43	Classification du trafic du NAN en fonction des délais maximums autorisés et ses tailles des paquets.	114
44	QoS-GRACO	116
45	Scénario1 : routage d'un paquet de CoT_3 en utilisant QoS-GRACO.	119
46	Scénario 2 : routage d'un paquet de CoT_2 en utilisant QoS-GRACO	121
47	Scénario 3 : routage d'un paquet de CoT_1 en utilisant QoS-GRACO. Le paquet est transmis en utilisant les pistes de phéromones puis le <i>QoS-aware greedy forwarding</i> jusqu'à arriver sa destination. . .	122
48	Mapping des classes de trafic aux couleurs de phéromones préférées et alternatives.	122
49	Coût de transmission en fonction du nombre de paquets de données envoyé - couche MAC idéale	124

50	Coût par paquet en fonction du nombre de paquets de données envoyé - couche MAC idéale	125
51	Coût de transmission en fonction du nombre de paquets de données envoyé - 802.15.4 MAC	126
52	Coût par paquet en fonction du nombre de paquets de données envoyé - 802.15.4 MAC	126
53	Délai de bout-en-bout en fonction du nombre de paquets de données envoyé - couche MAC idéale	128
54	Délais de bout-en-bout par paquet en fonction du nombre de paquets de données envoyé - couche MAC idéale	128
55	Délais de bout-en-bout en fonction du nombre de paquets de données envoyé - 802.15.4 MAC	129
56	délai de bout-en-bout par paquet en fonction du nombre de paquets de données envoyé - 802.15.4 MAC	129
57	taux de livraison et pourcentage des paquets respectant les qualité de service (QoS) exigées - MAC idéale et 802.15.4 MAC	130
58	Pourcentage des paquets respectant les QoS exigées par classe de trafic - 802.15.4 MAC	131

List of Algorithms

1	GRACO(U) - Exécuté par chaque nœud U sur réception d'un message $M(U, D)$	26
2	ph_assisted_greedy(U, D) - Exécuté par chaque nœud U sur réception d'un message $M(U, D)$	28
3	aco_recovery(K, D) - Exécutez le nœud bloquant K pour déclencher la phase de récupération en diffusant la première <i>Fant</i>	32
4	Forward_Fant($FANT(K, D)$) - Exécuté à chaque nœud U à la réception d'une <i>Fant</i> destinée à D et émise par le nœud bloquant K	35
5	Forward_Bant($BANT(K, D)$) - Exécuté à chaque nœud U à la réception d'une <i>Bant</i> destinée à K	36

*

Introduction

Dans ce premier chapitre, nous introduisons le contexte général de la thèse ainsi que la problématique visée et nous citons nos contributions. Ensuite, nous donnons une vision globale de la structure de ce mémoire. Nous décrivons, enfin, les notations et modèles utilisés tout au long du document.

Contexte

L'utilisation du terme *smart* est devenue fréquente dans notre quotidien. Des appellations comme *Smart Meters*, *Smart Grids*, *Smart Cities*, *Smart Transports*, *Smart Buildings* etc, sont en forte croissance. Le concept *Smart* se base principalement sur l'intégration des technologies de l'information et de la communication (TIC) dans des produits et des systèmes afin d'optimiser leur performance en améliorant leurs fonctionnalités existantes et en ajoutant de nouvelles fonctionnalités. Ainsi, les *Smart Meters*, pour compteurs intelligents, permettent un comptage évolué en multipliant les fonctionnalités des compteurs ordinaires : communication des informations, gestion de la charge des réseaux, délestage de charge, tarification dynamique, efficacité énergétique, etc [5]. Aussi, les *Smart Grid* (SG), pour réseaux d'électricité intelligents, visent à améliorer la fiabilité de l'approvisionnement électrique, en permettant une meilleure gestion du réseau électrique, flexible et bidirectionnelle combinant la distribution et la collecte de productions distribuées [6]. Quant au concept de *Smart Cities*, pour villes intelligentes, son objectif est d'améliorer la qualité de vie et l'efficacité des services urbains notamment via le comptage, la gestion des flux de l'énergie, de l'eau, des déplacements, des passagers, des émissions, des déchets, etc, tout en respectant les besoins économiques, sociaux, qu'environnementaux [7]. En effet, l'intégration des TIC permet de créer un environnement intelligent et durable en améliorant, d'une part, les services existants et en permettant, d'autre part, le développement de nouveaux services innovants et avancés (comme la gestion

de bornes de recharge de véhicules électriques, l'éclairage public intelligent, la vidéo-surveillance, la gestion intelligente des déchets, la gestion active de la demande et la consommation d'électricité, *etc.*...).

Comme déjà évoqué, le réseau d'électricité est l'un des nombreux secteurs qui n'ont pas échappé à cette déferlante technologique. Aujourd'hui, le réseau électrique conventionnel est confronté à de nouveaux défis liés au contexte de la transition énergétique, avec notamment une évolution des modes de consommation et de production et une intégration massive des énergies renouvelables au caractère intermittent et décentralisé. Il ne peut plus se contenter du rôle historique pour lequel il a été conçu. Il doit désormais prendre en compte les nouvelles sources d'énergies renouvelables sporadiques et décentralisées (fermes à éoliennes, photovoltaïques ...), et les nouveaux et futurs usages (véhicules électriques, stockage d'électricité ...). Ainsi, les opérateurs des réseaux d'électricité doivent s'adapter pour optimiser le fonctionnement de leurs réseaux et adopter un mode de gestion plus proactif pour garantir la qualité de service et respecter les nouvelles contraintes (compteurs communicants, réduction CO_2 ...) [8]. Ces nouvelles contraintes iront grandissant dans les années à venir. Pour ce fait, le passage du réseau d'électricité conventionnel au réseau intelligent (SG) est devenu une nécessité.

Le concept SG consiste à utiliser tout le potentiel des technologies numériques pour répondre aux nombreux défis posés au système électrique. En déployant des capteurs positionnés tout au long du réseau ainsi que des compteurs intelligents, il permet de suivre l'état du réseau en temps réel, d'assurer la sécurité et la qualité de l'approvisionnement en électricité, de maîtriser la demande surtout pendant les heures de pointe, ou encore faciliter l'insertion des énergies de source renouvelable, ce qui permet la réduction des coûts d'énergie et l'amélioration de la fiabilité du réseau.

Le passage du réseau d'électricité classique au réseau intelligent est conditionné par le déploiement des infrastructures de contrôle et de communication, en parallèle avec l'infrastructure d'électricité depuis les sites de production vers les consommateurs en passant par les réseaux de transport et de distribution [9]. Le développement de nombreux concepts avancés et de services compte ainsi sur la pertinence de l'infrastructure de communication. Le segment distribution, auquel sont connectés les utilisateurs finaux, doit subir le développement de la majorité des nouvelles fonctionnalités et applications du SG telles que l'intégration de la production et stockage distribués d'énergie au niveau du réseau de distribution, les compteurs intelligents, la gestion active de la demande

et l'automatisation de la gestion du réseau de distribution, *etc.* Durant cette thèse, nous nous sommes concentrés sur l'infrastructure de communication pour le niveau de distribution, à savoir les réseaux de voisinage (*neighborhood area network* (NAN)). Notre travail s'est axé autour de l'utilisation des réseaux sans fil maillés comme technologie de communication pour le NAN. Nous sommes particulièrement intéressés au problème de routage des données sur ce réseau. Confronté à de nombreux défis liés aux caractéristiques physiques du réseau, aux particularités de l'environnement dans lequel sont déployés les dispositifs communicants et aux exigences de QoS des applications développées sur le réseau, le routage des données sur le réseau NAN est une tâche très critique. En effet, l'efficacité des services utilisant ces données, voire même celle du réseau, dépend de l'efficacité du mécanisme de transmission des données entre les différentes entités du réseau.

Thèse

En cherchant à résoudre cette problématique, la thèse défendue dans ce mémoire vise à définir un nouveau protocole de routage de données pour les réseaux de capteurs sans fil dans le contexte du SG, plus particulièrement pour les réseaux NAN. Ce protocole doit être capable de surmonter tous les défis évoqués plus haut et répondre aux exigences demandées avec un minimum de complexité additionnelle.

Le routage géographique est un paradigme de routage très apprécié pour les réseaux de capteurs sans fil qui sont particulièrement contraints. Ce type de routage requiert que les nœuds du réseau connaissent leur position géographique. En utilisant seulement des données locales, les protocoles de routage géographiques utilisent des mécanismes relativement simples pour faire progresser les paquets de données vers leur(s) destination(s). Ainsi, au contraste des autres paradigmes de routage traditionnels, ce type de routage n'a pas besoin d'inonder le réseau pour délivrer les données. Il n'a pas besoin non plus d'utiliser des paquets de contrôle pour explorer les routes ni de stocker de tables de routage. Il est ainsi local, distribué, sans boucle et sans mémoire, et par conséquent évolutif et scalable.

Pour les réseaux NAN, les dispositifs communicants (capteurs, compteur intelligents (CIs), *etc.*) ont des positions géographiques fixes et connues *a priori*. Pourquoi ne pas profiter de cette particularité au lieu d'opter pour un routage qui risque d'inonder le réseau pour la recherche des routes entre les extrémités du réseau ? De plus, les réseaux NAN sont très dynamiques, tout changement dans la topologie ou toute extension engendre le déclenchement du processus de découverte des nouvelles routes ou de modification de celles qui existent déjà.

Vues les particularités du réseau NAN, le routage géographique est un candidat très adapté.

Les contributions de cette thèse peuvent être résumées comme suit.

1. Dans un premier temps, nous avons proposé un nouveau protocole de routage géographique pour les réseaux de capteurs et actionneurs sans fil utilisant un processus de réparation basé sur l'Ant Colony Optimization (ACO). Le fonctionnement de ce protocole a été évalué dans le cas général des réseaux de capteurs et actionneurs sans fil par des simulations. Ses performances ont été comparées avec celles de l'une des meilleures solutions de la littérature.
2. Dans un second temps, nous avons montré l'adéquation du protocole proposé pour le routage des données dans les réseaux NAN, et nous avons étudié son fonctionnement et ses performances dans un environnement NAN.
3. Enfin, nous avons adapté le protocole afin de répondre aux exigences des applications utilisant ce réseau. Donc, une nouvelle version du protocole de routage multi-chemins tenant compte des qualités de services de ces applications a été proposée. De ce fait, nous avons étudié le trafic des données en utilisant des bases de données et des études publiées par plusieurs organismes impliqués dans les définitions du SG comme *IETF*, *U.S. Department of Energy*, *NIST Open SG SG-Network Task Force*. Nous avons proposé un plan de priorité de cinq niveaux pour le trafic des données du NAN, ainsi qu'une classification basée sur les qualités de service exigées par les paquets.

Structure de la thèse

Le manuscrit comporte 7 chapitres organisés en deux grandes parties :

1. La première partie concerne le routage géographique dans les réseaux de capteurs sans fil en général, elle se compose de deux chapitres ;
 - **le chapitre I** présente l'état de l'art sur le routage géographique. Nous décrivons d'abord les mécanismes de routage géographique en mettant l'accent sur leurs avantages et inconvénients. Ensuite, nous détaillons les différents mécanismes de récupérations présentés dans la littérature.
 - **le chapitre I** décrit la première contribution de la thèse, notamment le protocole de routage GRACO. Nous détaillons d'abord son principe

de fonctionnement, puis nous évaluons ses performances à travers des simulations.

2. La deuxième partie se concentre sur cette problématique dans le cas particulier des SGs, elle est formée de trois chapitres ;
 - **le chapitre II** introduit le contexte du SG, et ses concepts de base utilisés les prochains chapitres tels que ses réseaux de communications et ses applications.
 - **le chapitre II** étudie la faisabilité du protocole de routage GRACO dans les réseaux NAN du SG.
 - **le chapitre II** décrit QoS-GRACO, la nouvelle version de GRACO qui tient compte des QoS des applications du NAN.

Enfin, le **chapitre II** conclut ce mémoire de thèse et présente les perspectives et les orientations pour la poursuite de ce travail de recherche.

Notations, modèles et hypothèses

Nous décrivons ici les différentes notations et hypothèses utilisées dans les différents chapitres de cette thèse.

Nous supposons que tous les nœuds connaissent leurs coordonnées.

Un réseau de capteurs sans fil peut être modélisé par un graphe noté G tel que $G=(V,E)$ où V représente l'ensemble des capteurs, aussi appelés nœuds, et E l'ensemble des liens radio existants. Nous notons (SD) la droite passant par les nœuds S et D , le chemin de routage entre ces deux nœuds étant noté $S\hat{B}D$. La distance euclidienne entre S et D est notée $|SD|$. Nous supposons que chaque nœud a une portée de transmission de rayon R . Un lien radio entre les nœuds u et v ($u, v \in E$) existe si u et v sont à portée de transmission l'un de l'autre, , i.e. $|uv| \leq R$. L'ensemble physique de nœuds qui sont à portée de transmission de u est noté $N(u)$ et appelé le voisinage du nœud u , $N(u) = \{v \in V \text{ tel que } |uv| \leq R\}$. Tout nœud $v \in N(u)$ est appelé voisin de u . Nous notons $|N(u)|$ le nombre de voisins de u .

Nous définissons également $N_D(u)$, un sous-ensemble de $N(u)$, référant à l'ensemble des voisins de u qui sont plus proches de D que u , i.e. $N_D(u) = \{v \in N(u) \text{ tel que } |vD| \leq |uD|\}$. Le lien orienté du nœud u au nœud v est noté \overrightarrow{uv} .

Dans ce qui suit, nous appelons "nœud courant" le nœud essayant d'acheminer un paquet et nous utilisons le terme *NextNode* pour désigner le prochain saut dans le chemin d'un paquet.

Nous notons $C(A, r)$ le cercle C de centre de A et de rayon r . Pour deux nœuds A et B , le cercle $C(A, |AB|)$ est le cercle C de centre de A et de rayon $|AB|$.

Nous appelons zone de progrès positif d'un nœud U vers une destination D ,

l'intersection des deux cercles $C_1(U, r)$ et $C_2(D, |DU|)$. Cette zone rassemble des nœuds de $N_D(U)$.

Tout nœud K ayant sa zone de progrès positive vers une destination donnée D vide, *i.e* $N_D(K) = \emptyset$, est dit nœud bloquant.

Première partie

Routage géographique avec garantie de livraison dans les réseaux de capteurs sans fil

*

État de l'art : Routage Géographique

Dans la première partie de cette thèse, nous nous concentrons sur le routage géographique dans les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs).

Les RCSFs sont composés d'un nombre important (jusqu'à plusieurs milliers) de nœuds intelligents communicants déployés dans une zone à couvrir. Ces nœuds sont capables d'accomplir trois tâches : surveiller et capter des données physiques, traiter ces données, et les acheminer, d'une manière autonome, de proche en proche vers leur destination. Les applications de tels réseaux sont multiples, allant de la défense [10], la surveillance [11], aux maisons intelligentes [12][13] et aux réseaux d'électricité intelligents [14][15]. Toutefois, les capteurs sont limités en termes de bande passante, de puissance de calcul, de mémoire disponible et d'énergie embarquée.

Le routage de données est une tâche importante et critique à la fois. En effet, le protocole de routage est chargé de déterminer la bonne route pour acheminer les données d'un point à un autre tout en assurant certains objectifs exigés par les applications exploitant le réseau et en tenant compte de ses limites.

Le routage géographique, l'un des paradigmes de routage les plus populaires dans les RCSFs, possède de bonnes propriétés et offre plusieurs avantages.

Ce chapitre présente l'état de l'art du routage géographique. Nous introduisons ici le concept de routage géographique, ses avantages et inconvénients. Nous étudions, par la suite, les mécanismes introduits pour contourner ce problème.

Le routage géographique

Le routage géographique se base principalement sur la notion de la position géographique. En effet, tout nœud doit connaître sa position géographique, celles de ses voisins et de la destination. Un nœud est capable de connaître sa position grâce à un mécanisme de localisation (*ex* un récepteur GPS [16] , les techniques de positionnement [17]) ou une pré-configuration lors phase de déploiement. Il connaît les positions géographiques de ses voisins en échangeant

des paquets *hello*, quant à la position de la destination, elle peut être incluse par le nœud source dans le paquet ou bien pré-configurée dans le cas où les puits (collecteurs de données) sont connues *a priori*. Bien que tous les protocoles de routage utilisent les positions géographiques pour le routage des paquets de données, ils diffèrent dans la manière de les exploiter. Chaque protocole définit sa propre stratégie d'acheminement permettant de décider le prochain saut. Toutefois, cette sélection se fait toujours dans le même sous-ensemble des voisins du nœud courant : parmi ses voisins qui sont plus proches de la destination que lui, "la zone du progrès" afin d'avancer vers la destination à chaque étape. Dans la littérature, différentes stratégies de routage géographique ont été proposées. Nous expliquons quelques stratégies d'acheminement : en utilisant un exemple présenté dans la figure 1. Dans cet exemple, un nœud source S possède un paquet à transmettre vers le nœud destination D , S doit choisir un de ses voisins comme prochain saut. Les candidats sont N , A , G et M , les nœuds à portée de communication r . Dans cet exemple, on distingue les politiques de routage géographique suivantes :

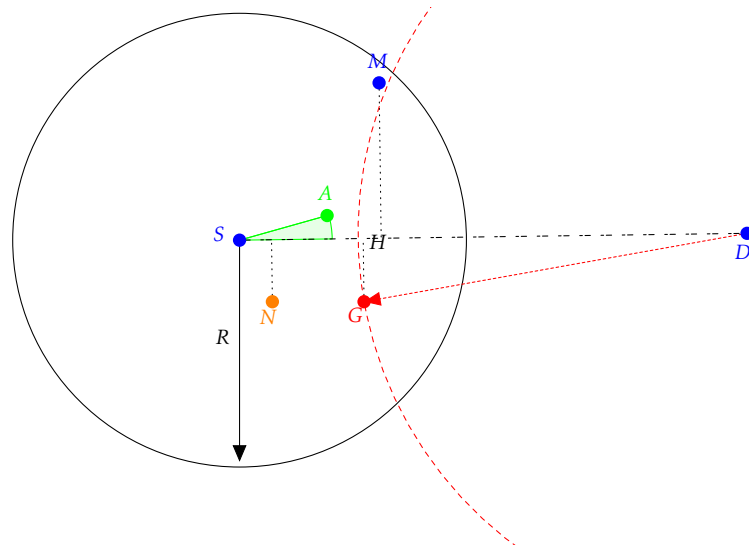


FIGURE 1 – Stratégies de routage géographique

- *Most Forward Within Radius (MFR)* [18] : consiste à choisir le voisin qui maximise le progrès vers D , autrement dit, qui minimise la distance euclidienne entre la projection orthogonale du voisin sur la droite (SD) et la destination D dans le but de maximiser la progression vers D . Parmi les voisins de S , M est le prochain saut en utilisant MFR puisqu'il maximise le progrès vers D ($|HD|$ la distance entre la projection orthogonale de M sur la droite (SD) et D est plus courte parmi celles effectuées par les voisins de

S).

- *Greedy Routing* [19] : vise aussi à maximiser la progression vers la destination D mais en considérant la distance au lieu du progrès. Ainsi, S transmet le paquet au voisin qui minimise la distance euclidienne à la destination. G , étant le plus proche voisin de D , est donc le prochain saut en utilisant *greedy routing*.
- *Nearest with Forward Progress (NFP)* [20] : S choisit le voisin qui minimise le progrès vers D dans le but de minimiser la probabilité de perte de paquets à cause des collisions et de l'atténuation du signal. Comme montré dans la figure 1, N est le voisin effectuant le progrès minimal vers D , N est le prochain nœud relais selon la méthode NFP.
- *Compass Routing* [21] : consiste à acheminer le paquet vers le nœud situé dans la direction la plus proche par rapport à la ligne (SD) . Ainsi, S choisit le nœud voisin V qui minimise l'angle \widehat{VSD} . A est le voisin qui fait le plus petit angle avec (SD) , alors A est le prochain saut en utilisant *Compass*.

En plus de sa simplicité, le routage géographique est très apprécié et offre de bonnes performances aux RCSFs en raison de ses caractéristiques :

- localité : les décisions d'acheminement et routage des paquets sont prises en utilisant les informations locales seulement.
- fonctionnement distribué : le même algorithme sera exécuté sur tous les nœuds.
- sans état et sans mémoire puisque les décisions sont prises à chaque étape et indépendamment des choix précédents, un nœud n'a donc pas besoin de garder des tables de routage.
- absence des boucles : en essayant de progresser à chaque étape on évite les boucles dans les routes.
- évolutif/passage à l'échelle : toutes les caractéristiques citées ci-dessus améliorent la flexibilité du routage géographique dans les réseaux de grande échelle et de densité croissante.

Ainsi, le routage géographique est très avantageux pour les RCSFs, en particulier, le routage *greedy* ou glouton, étant le mécanisme d'acheminement le plus simple. Cependant, ce type de routage souffre d'un problème, surtout dans les réseaux peu denses ou hétérogènes. L'échec du routage *greedy* est dû à l'absence de voisins plus proches de la destination que le nœud courant. La figure 2 illustre une telle configuration. Le nœud courant K ne possède aucun voisin plus proche de la destination D qu'il ne l'est lui-même, *i.e.* $N_D(K) = \emptyset$. Ce nœud représente un extremum local du chemin de routage vers la destination D , il fait face à une *zone vide*. On parle d'un vide, trou de communication ou encore impasse. Le nœud ne

pouvant plus faire progresser le paquet malgré l'existence d'au moins un chemin vers la destination, il est donc un nœud bloquant. Ce problème peut être causé

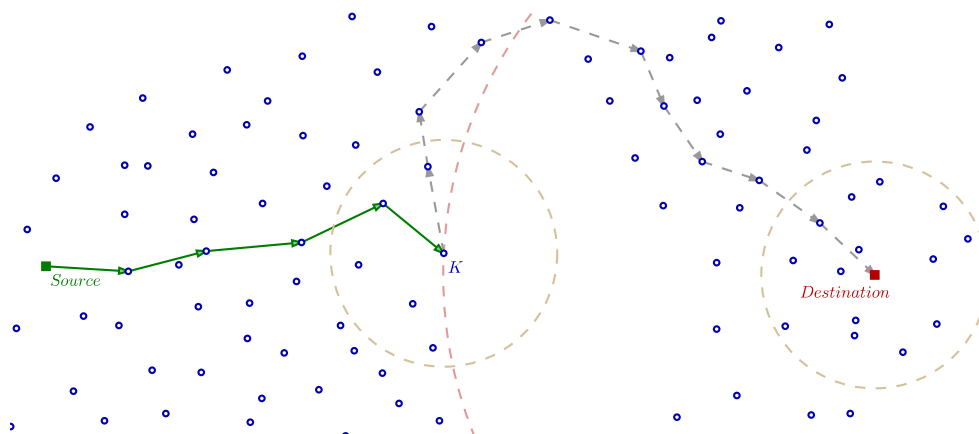


FIGURE 2 – Le nœud K n'a pas de voisins dans sa zone de progrès positif vers D . Malgré qu'il existe un chemin vers D (marqué en pointillés), le nœud K ne peut plus faire progresser le paquet en utilisant le routage glouton.

par de nombreux facteurs, tels que le déploiement éparé et déséquilibré, les défaillances ou épuisements de batterie de certains nœuds, des interférences ou de signaux de brouillage hostiles et les obstacles physiques tels que des bâtiments ou des arbres *etc* [22].

Mécanismes de récupération

Résoudre le problème de trous de communication dans le routage géographique dans les RCSFs fait l'objet d'un effort de recherche considérable, de nombreuses études ont mis l'accent sur ce sujet et plusieurs solutions ont été proposées. Les stratégies de récupération existantes peuvent être classées en six catégories [23, 24, 25] : routage par inondation, routage sur graphe planaire, routage géométrique, routage heuristique et routage hybride.

Intuitivement, la technique de récupération la plus simple est le routage par inondation, initié au niveau du nœud bloquant et ensuite exécuté dans tout nœud recevant le paquet bloqué pour la première fois. Les stratégies de routage basées sur le concept d'inondation original ou sur d'autres techniques d'inondation avancées comme *one-hop flooding* [26], *Partial Hop-by-hop Routing (PHR)* utilisé dans le protocole *Geographic Routing Algorithm (GRA)* [27], et *Partial Source Routing (PSR)* utilisé dans le protocole *On-demand Geographic Forwarding*

(OGF) [28]) ont été proposées pour recouvrer du problème d'extremum local dans le routage géographique. Ces techniques garantissent la délivrance du paquet bloqué à sa destination si au moins un chemin existe, cependant, elles sont très coûteuses en termes d'utilisation des ressources.

Les techniques de récupération à base du routage sur graphe planaire fonctionnent en deux phases. Une phase de planarisation du graphe est d'abord appliquée afin de créer un sous-graphe planaire du graphe original du réseau. Un graphe planaire est un graphe n'ayant pas d'arêtes qui se croisent. La deuxième étape consiste à l'utilisation d'un algorithme qui permet de router les paquets dans le graphe planaire créé. *Face* [29] a été utilisé comme l'algorithme transversal de graphe planaire de base dans les techniques de récupération à base du routage sur graphe planaire. Avec *Face*, le message à router parcourt la périphérie des *faces* traversées par la droite (SD). Le message progresse ainsi de face en face vers la destination. Toutefois, la longueur des chemins de routage calculés par cette approche augmente de manière significative avec le degré moyen du graphe [30].

Afin de profiter des avantages du routage *greedy* ainsi que de *face*, plusieurs protocoles de routage utilisant la combinaison *Greedy-Face* ont été proposés [31][32] tels que Greedy-Face-Greedy (GFG) [33], Greedy Perimeter Stateless (GPSR) [34] (en réalité GPSR est le nom du protocole correspondant à l'algorithme GFG [35]), Greedy Autres Adaptive face (Routing GOAFR+) [36]. Ces protocoles se basent principalement sur le routage *greedy* et utilisent *Face* comme mécanisme de récupération en cas d'échec du routage *greedy* et dès lors que l'impasse est dépassée, le mode d'acheminement reprend le mode *greedy*. Ainsi, l'utilisation de face est réduite, et donc les chemins générés sont plus courts. Les approches de récupération de cette catégorie dépendent principalement de la phase de la construction et le maintien de la graphe planaire, cette étape repose fortement sur l'hypothèse du disque unitaire qui est difficile à réaliser dans des environnements réalistes où les liens sont instables. Par ailleurs, la phase de planarisation et la maintenance du graphe provoque une surcharge significative en terme de paquets de contrôle, surtout dans le cas de réseaux à grande échelle, ce qui introduit des coûts supplémentaires en termes de délai, messages de contrôle et consommation d'énergie.

Dans les techniques de récupération géométrique, l'idée de base est l'utilisation des caractéristiques géométriques pour identifier les régions vides. Cette catégorie comprend des solutions de prévention de vide, telles que les techniques proposées dans [37, 38, 39, 40, 41, 42, 43], où les trous de couverture sont découverts à l'avance pour l'utilisation future du routage afin des l'éviter. Ces

solutions commencent généralement par une phase d'exploration du réseau pour identifier les zones vides en détectant les nœuds situés sur les frontières de ces zones et un mécanisme d'acheminement qui exclut ces nœuds du processus de routage. Ceci est accompli par la diffusion des informations concernant les zones vides afin d'enregistrer l'état du réseau, et l'envoi des *feedbacks*, ce qui génère un surcoût important en termes de paquets de contrôle provoquant ainsi l'épuisement de l'énergie en particulier pour les nœuds situés sur les bords des trous de couverture. En outre, les nœuds ont besoin de beaucoup plus de ressources telles que la capacité mémoire par rapport aux autres techniques de recouvrement afin d'enregistrer les informations concernant les trous de couverture déjà explorés, surtout quand les zones vides sont très vastes.

Dans les stratégies de récupération en fonction des coûts, une valeur de coût sera attribuée à tous les nœuds du réseau dépendant de la destination, par la suite les paquets seront acheminés du nœud avec un coût plus élevé vers un nœud avec un coût inférieur. La définition du paramètre de coût dépend du protocole. La performance des techniques de récupération en fonction des coûts dépend du nombre de destinations, du nombre de nœuds bloquants, et la dynamique du réseau [23]. Les approches de cette catégorie fonctionnent bien dans les réseaux sans fil statiques avec un nombre modéré de nœuds bloquants et un nombre limité de nœuds destination dans un réseau relativement petit. Sinon, la phase de récupération va générer un surcoût en termes de messages de contrôle en raison du processus d'ajustement et de maintenance des coûts dans les frontières des régions vides.

Les techniques de récupération heuristiques consistent à exploiter des ressources supplémentaires ou en utilisant certaines propriétés inhérentes de la topologie du réseau et certaines propriétés géographiques de zones vides [23] comme l'utilisation de moyens de communication alternatifs existant dans le réseau, l'augmentation progressive de la puissance de transmission du nœud bloquant afin de chercher un voisin de progrès positif, ou la participation passive dans le processus de routage *i.e* un nœud ne participe pas dans le routage des paquets de données tant qu'il n'est pas capable de trouver des voisins avec progrès positif, *etc.* Cependant, ces techniques ne sont pas toujours efficaces, ou même possibles.

Les techniques de récupération hybrides, telles que celle proposée dans [44], combinent au moins deux techniques de recouvrement pour gérer plus efficacement les impasses et trous de couverture. Généralement, cette combinaison augmente la complexité de la phase de récupération par rapport aux autres

mécanismes des autres catégories et souffrent des mêmes inconvénients.

La tableau 1 récapitule les techniques de recouvrement.

Catégorie	Caractéristiques	Avantages	Limites
routage par inondation	diffuser du paquet bloqué jusqu'à arriver à sa destination	local - sans état - réactif - faible complexité - livraison garantie	surcoût élevé en termes d'utilisation de ressources
routage sur graphe planaire	combinaison d'une phase de planarisation avec un algorithme de routage sur graphe planaire	local - sans état - réactif - moyenne complexité - livraison garantie	surcoût élevé en termes de délai, messages de contrôle, consommation d'énergie
routage géométrique	identifier les régions vides avant de commencer le routage	local - avec état - proactif	complexité élevée - surcoût élevé en termes de paquet de contrôle et d'utilisation de ressource (mémoire)
routage en fonction du coût	attribuer une valeur de coût aux nœuds dépendant de la destination	bonnes performances dans les réseaux statiques avec nombre limité de destination et de nœuds bloquant	surcoût élevé en termes de paquets de contrôle - complexité élevée
techniques heuristiques	exploiter des ressources supplémentaires	local - sans état - réactif - faible complexité	pas toujours efficaces ou possibles
techniques hybrides	combinaison de plusieurs techniques de recouvrement	plus efficace qu'une seule technique de récupération	complexité élevée - surcoût élevé en termes de délai, messages de contrôle, consommation d'énergie

TABLEAU 1 – Les caractéristiques des techniques de récupération

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit le concept du routage géographique. Ce type de routage est très avantageux pour les réseaux de capteurs sans fil. Il est local, distribué, sans boucle, sans mémoire et évolutif. Par contre, ce paradigme de routage échoue quand le paquet arrive à un vide. De ce fait, il est généralement combiné avec un processus de récupération pour contourner ce problème. Nous avons, par la suite, étudié les différents techniques de récupération proposées dans la littérature. Bien que celles-ci résolvent le problème de vide qui bloque le routage géographique, elles ajoutent des coûts significatifs en terme de messages de contrôles, délais de transmission des données, capacité mémoire utilisée, consommation d'énergie, *etc.* Dans le chapitre suivant, nous proposons un protocole de routage géographique utilisant une nouvelle technique de récupération basée sur l'ACO permettant de résoudre efficacement le problème des vides avec une complexité minimale ajoutée. Au mieux de nos connaissances, aucune stratégie de récupération basée sur l'ACO n'a encore été proposée.

*

GRACO : un protocole de routage géographique glouton avec phase de récupération basée sur l'optimisation par colonies de fourmis

Dans ce chapitre, nous proposons un nouveau protocole de routage géographique qui garantit la livraison des paquets de données. Ce protocole utilise un nouveau mécanisme de récupération basé sur l'optimisation par colonies de fourmis combinée avec un concept de zone géographique.

Motivation

Les processus de routage géographique, en particulier le routage glouton (*greedy*), sont bien appréciés pour les RCSFs grâce à ses nombreux avantages (local, distribué, sans boucle, sans mémoire, évolutif). Mais, ce paradigme de routage souffre d'un unique inconvénient ; le problème du vide. Pour ce fait, il est, généralement, couplé avec un processus de récupération pour résoudre le problème du vide. Dans le chapitre I, nous avons étudié les techniques de récupération proposées dans la littérature. Ces techniques fonctionnent bien dans les réseaux statiques. Toutefois, tout changement dans la position ou la forme de la zone vide nécessite le déclenchement du processus de maintenance avec un traitement supplémentaire et des coûts supplémentaires et provoquant ainsi des retards dans la livraison des données. Pour pallier ces inconvénients, nous proposons une technique de récupération efficace pour le routage *greedy* basée sur l'ACO. Cette technique permet une gestion des impasses plus efficace avec une meilleure flexibilité et rapidité face aux changements brusques de l'état du réseau. Le protocole proposé est ainsi capable d'ajuster le processus de routage de façon adaptative pour éviter les situations bloquantes face aux vides et délivrer efficacement les paquets de données.

Optimisation par colonie de fourmis

L'intelligence d'essaim [45] est une théorie basée sur des phénomènes biologiques utilisée pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes. Elle a été définie, pour la première fois, en observant les comportements complexes de certaines espèces d'insectes et d'animaux, *e.x* les fourmis, les abeilles, les poissons, les oiseaux, *etc* [46]. Un essaim présente un groupe d'agents qui communiquent les uns avec les autres, directement ou indirectement, en agissant sur leur environnement local. En effet, les agents suivent des règles simples et distribuées, mais l'interaction entre les différents membres mène à un comportement global intelligent. Les membres du système sont capables, de façon étonnante, de s'adapter aux changements imprévisibles de leur environnement et de résoudre des problèmes relativement complexes. Les algorithmes utilisant l'intelligence d'essaim se basent sur quatre principes : l'intensification (feedback positif), la diversification (l'aspect aléatoire), l'évaporation (feedback négatif), et les interactions. L'échange de ces informations est accompli via une communication indirecte en utilisant l'environnement comme un support de communication, ce mécanisme de communication est appelé la *stigmergie*.

L'optimisation par colonies de fourmis (ACO) [47] est une méta-heuristique basée sur l'intelligence d'essaim imitant le comportement des fourmis à la recherche de nourriture. En effet, les fourmis sont capables de trouver le chemin le plus court entre leur nid et une source de nourriture, sans aucune connaissance globale, aucun moyen ou mécanisme de coordination visible ou centralisé ni communication directe. En premier temps, les agents de la colonie commencent la recherche en suivant des chemins aléatoires jusqu'à trouver une source de nourriture. En se déplaçant entre le nid et la source de nourriture, les fourmis déposent au passage sur le sol une substance olfactive et volatile appelée phéromone. Cette substance permet ainsi de créer une piste chimique, sur laquelle les fourmis s'appuient. En effet, d'autres fourmis peuvent détecter les phéromones grâce à des capteurs sur leurs antennes. Après un certain temps, la plupart des fourmis suit le chemin le plus court du nid à la source de nourriture. Ainsi, les phéromones ont un rôle de marqueur de chemin : quand les fourmis choisissent leur chemin, elles ont tendance à choisir la piste qui porte la plus forte concentration de phéromones. Cela leur permet de retrouver le chemin vers leur nid lors du retour. D'autre part, les odeurs peuvent être utilisées par les autres fourmis pour retrouver les sources de nourritures trouvées par leurs congénères. Ce comportement permet de trouver le chemin le plus court vers la nourriture lorsque les pistes de phéromones sont utilisées par la colonie entière ainsi elles s'évaporent moins vite. Autrement dit, lorsque plusieurs chemins marqués sont à la disposition d'une fourmi, cette dernière peut connaître le chemin le plus court vers sa destination en fonction du taux de phéromones. Cette constatation

essentielle est la base de toutes les méthodes que l'on va développer plus loin. De plus, les fourmis sont capables de s'adapter au changement brusque de leur environnement. Dans le cas d'un obstacle qui barre la route des fourmis, comme montré dans la figure 3, celles-ci sont capables de l'éviter et de créer d'autres pistes en le contournant, tout en convergeant vers la route la plus courte de nouveau [48].

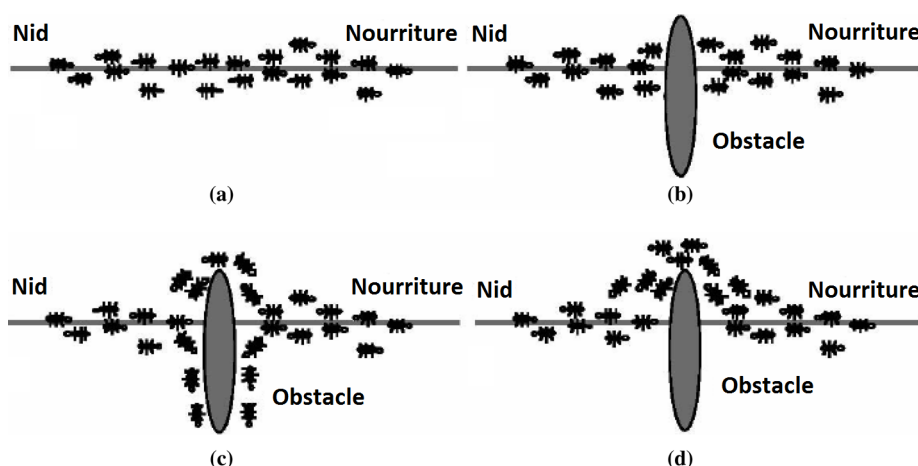


FIGURE 3 – effet de coupure d'une piste

La méta-heuristique ACO a été largement utilisée pour résoudre le problème de routage des données dans les réseaux informatiques. Plusieurs protocoles de routages ont été proposés en se basant sur l'ACO [49][50][51] [52]. ARA (Ant Colony Routing Algorithm) [53] est le premier algorithme de routage basé sur la méta-heuristique ACO et qui vise à réduire le surcoût du routage. La plupart des protocoles de routage basés sur l'ACO est dérivée de cet algorithme [54]. Généralement, le routage basé sur l'ACO utilise deux types d'agents, les paquets de fourmis éclaireuses et des paquets de fourmis de retour. Le premier type de fourmis est utilisé pour découvrir les chemins vers la destination et la seconde vise à déposer les traces de phéromones sur le chemin établi entre la source et la destination pour renforcer la piste. Des études comparatives des protocoles de routages basés sur l'ACO peuvent être trouvées dans [55], [51] and [54]. Ces études montrent que bien que les algorithmes de routage basé sur l'ACO sont capables de résoudre, avec succès, les problèmes du routage multi-contraintes et multi-objectifs, en plus de l'optimisation du chemin, ils produisent généralement des surcoûts élevés, puisque, dans le but de converger vers une solution optimale, ils ont besoin d'un comportement de colonie, *i.e* un nombre important de paquets de fourmis.

GRACO

Le protocole *geographic GReedy forwarding with ACO based recovery strategy* (GRACO) est un protocole de routage géographique qui combine deux modes de fonctionnement, un mode glouton et un mode de récupération. Le premier mode est une version modifiée du routage glouton ordinaire. Le deuxième mode est un mécanisme de récupération basé sur l'ACO, il est déclenché lorsque le premier mode est bloqué face à un vide. Dès lors cette phase débloquent le processus de routage, le protocole repasse en mode glouton. Ainsi l'utilisation d'ACO est réduite. L'algorithme 1 résume le processus de recherche de route sur un nœud.

Algorithm 1 GRACO(U) - Exécuté par chaque nœud U sur réception d'un message $M(U, D)$

```

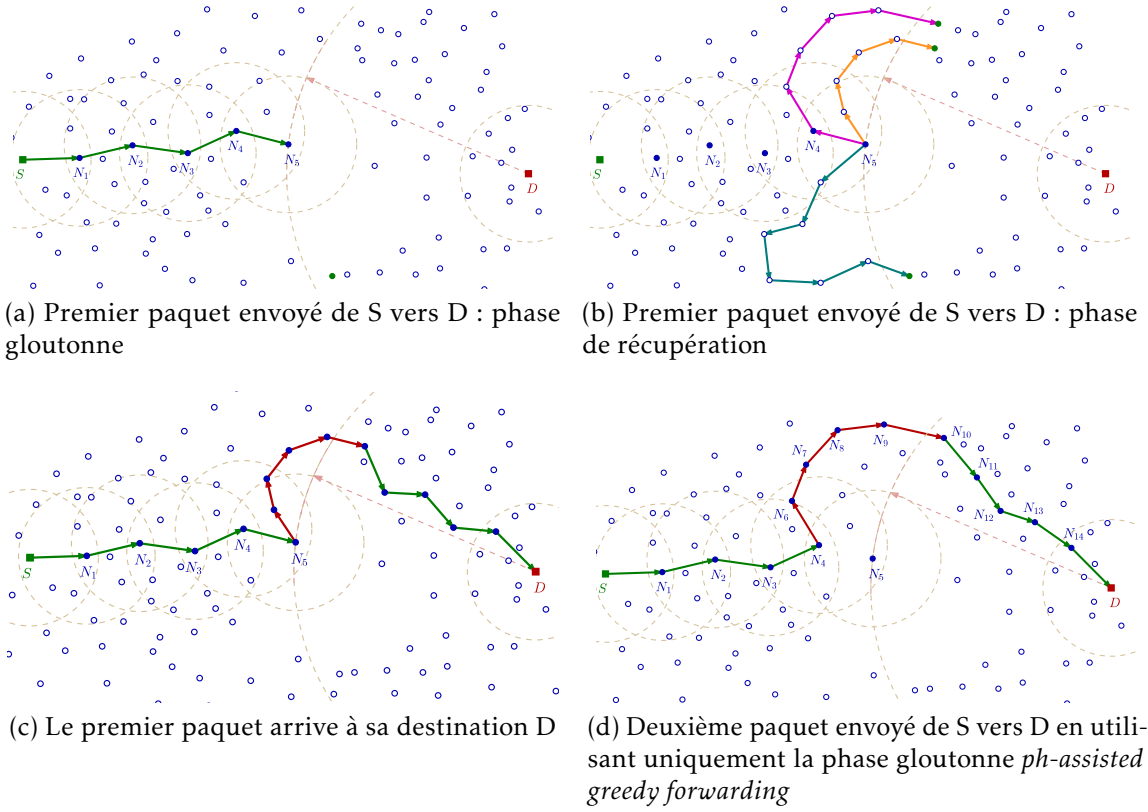
1: if  $U=D$  then
2:   EXIT ►  $U$  est la destination finale de  $M$ . Le routage a réussi.
3: else
4:    $ph\_assisted\_greedy(U, D)$  ► mode glouton
5:   if mode glouton échoue then
6:      $aco\_recovery(U, D)$  ► mode de récupération
7:   end if
8: end if

```

Mode glouton : *Ph-assisted greedy forwarding*

L'approche gloutonne utilisée par GRACO est une version modifiée du routage glouton original. L'acheminement des paquets en utilisant le routage glouton ordinaire est amélioré par l'utilisation des traces de phéromones des anciens processus de récupération. Un nœud S qui a un message à router vers une destination D va fonctionner comme suit. S va d'abord vérifier s'il possède des phéromones vers D . Si c'est le cas, cela signifie que le routage glouton a déjà échoué au préalable à progresser un paquet de données pour la même destination D , un mode de récupération a donc été lancé, et des traces des phéromones ont été déposées sur les routes trouvées. Pour cette raison, S utilise les pistes de phéromones pour router le paquet au lieu du routage glouton, ce qui permet d'éviter de retomber sur le même nœud bloquant. Dans le cas où S n'a aucune trace de phéromones pour D , S utilise le routage glouton ordinaire.

L'exemple présenté dans la figure 4 illustre le routage en utilisant *ph-assisted greedy forwarding*. La figure 4a montre un premier paquet de données, destiné à D , est acheminé d'un nœud à un autre en utilisant le routage glouton ordinaire

FIGURE 4 – Phase gloutonne : *ph-assisted greedy forwarding*

jusqu'à arriver à un vide, il est donc bloqué au nœud N_5 . Le nœud N_5 ne pouvant plus progresser le paquet de données lance alors le mode de récupération. La figure 4b illustre les routes trouvées pendant le processus de récupération, des traces de phéromones ont été déposées sur les nœuds appartenant à ces routes. Dans la figure 4d, le nœud N_5 procède, par la suite, à l'envoi du paquet de données bloqué en utilisant l'une des routes marquées par les phéromones. La figure 4d montre le routage d'un second paquet de données envoyé par S vers D . Le paquet est acheminé en utilisant le routage glouton ordinaire jusqu'à arriver à N_4 , où des traces de phéromones vers D existent déjà, le paquet est donc acheminé en utilisant les phéromones. Le paquet ne tombe pas dans le vide. Dans un second temps, S envoie un deuxième paquet de données vers la même destination D . Le paquet de données a été transmis de S à N_4 en suivant le routage glouton ordinaire. En arrivant au nœud N_4 , le paquet trouve une piste de phéromones vers D , il suit alors cette piste. L'algorithme 2 détaille le fonctionnement du mode *Ph-assisted greedy forwarding*.

Algorithm 2 $ph_assisted_greedy(U,D)$ - Exécuté par chaque nœud U sur réception d'un message $M(U,D)$

```

1:  $NextNode \leftarrow -1$ 
2: if  $existPh(U,D) = \mathbf{true}$  then {► Il existe déjà des phéromones pour  $D$ }
3:   Sélectionner  $NextNode$  en utilisant la formule (1) puis la formule
4: else
5:   if  $N_D(U) \neq \emptyset$  then
6:      $NextNode \leftarrow \max_{v \in N_D(U)} ||UD| - |vD||$  ► routage glouton ordinaire, on choisit le
       nœud voisin le plus proche de la destination
7:   else
8:     mode glouton échoue
9:   end if
10: end if
11:  $Send(M(NextNode,D))$  ► transmettre le message au  $NextNode$ 

```

Mode de récupération : *ACO based Recovery*

Le mécanisme de récupération prend le relais dès lors que le routage glouton n'est plus possible. Si le routage glouton a échoué, c'est que le nœud courant se trouve face à un vide qui peut être causé par un obstacle ou à une zone de densité trop faible pour permettre un routage glouton, et qu'aucune phéromone n'avait été déposée auparavant. GRACO utilise un nouveau schéma de récupération basé sur l'ACO pour créer un contournement de l'obstacle autour de la zone vide et vers la destination de telle sorte que le routage *greedy* puisse reprendre dessus. Le mécanisme de récupération proposé *ACO-based Recovery* utilise deux types de fourmis : les *Fants*, pour *Forward ants*, permettant de découvrir les routes, et *Bants*, pour *Backward ants*, permettant de marquer les routes trouvées. En outre, *ACO-based Recovery* utilise un concept de zones, permettant de guider les fourmis vers les zones les plus proches de la destination, que nous vous présentons dans ce qui suit.

Concept des zones

En utilisant le concept des zones [56], un nœud divise son voisinage en 4 zones en se basant sur sa position géographique et celle de la destination. Pour un nœud destination D , chaque nœud U partitionne ses voisins, dans un premier temps, en deux zones principales : une zone de progrès positif, appelé $zone_1$, et une zone de régression. Comme le montre la figure 5, $zone_1$ est la zone de progrès positif de U , elle rassemble les nœuds de $N_D(U)$ plus proches de D que ne l'est U . La zone de régression est, par la suite, divisée en 3 sous-zones : $zone_2$,

$zone_3$ et $zone_4$. Soit α l'angle de progression positive et β l'angle de régression, tel que présenté dans la figure 6, α est l'angle $\left(\overrightarrow{UB}, \overrightarrow{UA}\right)$ où A et B sont les points d'intersection des deux cercles $C_1(U, R)$ et $C_2(D, |DU|)$, et $\beta = 2\Pi - \alpha$. Pour un nœud $v \in N(U)$, θ est l'angle $\left(\overrightarrow{UD}, \overrightarrow{Uv}\right)$. Le nœud v appartient à :

- $zone_2$ si $\frac{\alpha}{2} < \theta \leq \frac{\alpha}{2} + \frac{\beta}{3}$
- $zone_4$ si $\frac{\alpha}{2} + \frac{\beta}{3} < \theta \leq \frac{\alpha}{2} + \left(2 \times \frac{\beta}{3}\right)$
- $zone_3$ si $\frac{\alpha}{2} + \left(2 \times \frac{\beta}{3}\right) < \theta \leq \frac{\alpha}{2} + \beta$

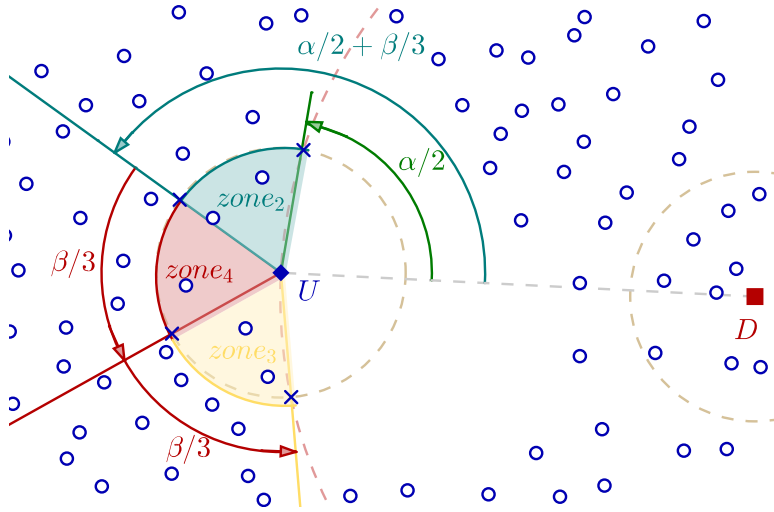
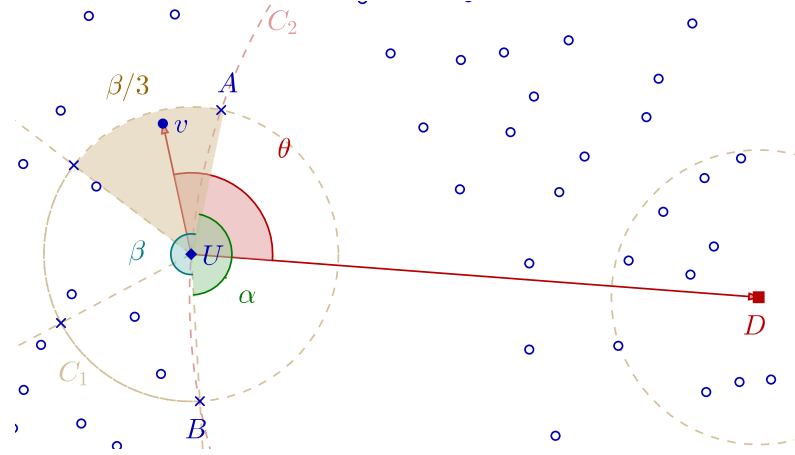


FIGURE 5 – Les différentes zones de U par rapport à la destination D

Initialisation des phéromones

Avant de commencer la phase de recherche d'itinéraire vers une destination D dans la phase de récupération, les quantités de phéromones déposées sur les liens doivent être initialisées. Chaque nœud U qui n'a pas de phéromone pour D et doit transmettre une *Fant* vers D , attribue une trace de phéromone à chacun de ses liens sortants pour D , ie, une valeur de phéromone initiale ϕ_{0j} est attribuée pour chaque voisin v de $N(U)$, avec $j \in \{1, 2, 3, 4\}$ et $zone_j$ étant la zone dans laquelle se trouve le nœud v , sachant que $\phi_{01} \geq \phi_{02} (= \phi_{03}) \geq \phi_{04}$.

La motivation pour cette étape est que, dans la plupart des cas, les chemins les plus courts passent par les voisins dont la direction est la plus proche de

FIGURE 6 – Illustration de α , β et θ

celle de la destination. Ainsi, l'attribution des valeurs initiales des phéromones dépendant de la zone incitera les fourmis à choisir la direction la plus proche de celle de la destination avec une plus forte probabilité, respectant ainsi le principe de *stigmergie*. Par conséquent, cette phase conduit à une convergence rapide vers les chemins les plus courts dans la plupart du temps.

La stratégie de récupération basée sur l'ACO suppose que chaque nœud maintient une table de phéromones, notée *PhTable* pour *pheromone table*, qui enregistre les valeurs de phéromones affectées à ses liens sortants pour des destinations différentes. Quand un nœud reçoit une *Fant* pour une destination spécifique D , il commence par chercher des phéromones pour D dans sa *PhTable*. Si de telles phéromones existent, ces valeurs seront utilisées pour choisir le prochain saut. Dans le cas contraire, un processus d'initialisation de phéromone est déclenché. Le processus d'initialisation de phéromone associe des pistes de phéromones à tous les liens sortants d'un nœud. Cependant, les pistes de phéromones qui ne sont pas mises à jour seront évaporées au cours du temps, selon le principe de l'évaporation du concept de la *stigmergie* dans les ACO. Si un lien n'est pas utilisé au bout d'un certain temps, son niveau de phéromone va être complètement évaporé, par conséquent, l'enregistrement correspondant dans la *PhTable* va être supprimé. De cette façon, le processus d'évaporation des phéromones réduit la quantité de données stockées dans les nœuds. L'impact du processus d'évaporation des phéromones est discuté dans la section I.

Établissement des routes

La phase de l'établissement des routes est accomplie en utilisant deux types de fourmis : *Fant* et *Bant*. Le rôle principal d'une *Fant* est d'explorer le réseau afin de trouver un itinéraire alternatif autour du vide. Pour cela, la *Fant* dépose sur son chemin une piste de phéromone qui sera utilisée plus tard par la *Bant* pour retourner au nœud bloquant. La *Bant* est chargée d'établir l'itinéraire précédemment trouvé par la *Fant* en déposant des traces de phéromone sur son chemin de retour vers le nœud bloquant, c'est le premier principe de la *stigmergie* ; l'intensification. La *Fant* et la *Bant* sont des paquets de tailles réduites, ces paquets enregistrent leur identifiant, la position du nœud bloquant et celle de la destination pour calculer son progrès à chaque étape, la position de la destination est aussi utilisée pour chercher les phéromones dans sa direction, la position et du nœud précédent pour éviter les boucles et le nombre de sauts pour décider la quantité de phéromones à déposer sur la route de retour en fonction de sa qualité. Nous détaillons l'utilisation de ces informations dans le processus de routage dans chaque étape du fonctionnement du protocole.

La phase de l'établissement des routes est déclenchée par le nœud bloquant K . En utilisant le caractère diffusant du médium radio, K étant un nœud bloquant, *i.e.* dont la zone de progrès positif est vide, diffuse la première fourmi *Fant* à ses voisins des zones de régression. Cette fourmi sera considérée et transmise uniquement par 3 voisins, un par zone, sélectionnés par K en utilisant le concept des zones et le progrès vers D . En effet, K choisit le voisin effectuant le meilleur progrès vers la destination dans chaque zone de régression, *i.e.* K choisit $N_k \in N(K)$ tel que $|KN_k| = \min\{|KN_j| \mid \forall N_j \in \text{zone}_i(K)\}$ avec $i \in \{2, 3, 4\}$. Les *IDs* des voisins sélectionnés sont stockés dans la *Fant* diffusée. Quand un voisin reçoit la *Fant*, il vérifie s'il figure dans la liste des voisins sélectionnés, si c'est le cas, le nœud retransmet le paquet, sinon il l'ignore.

La figure 7 illustre un exemple de nœud bloquant qui déclenche la phase de récupération. K diffuse un paquet *Fant* qui sera considéré uniquement par les 3 nœuds, N_1, N_3 et N_5 , chacun d'eux étant le plus proche de la destination dans sa zone.

La phase de récupération déclenchée par le nœud bloquant est décrite dans l'algorithme 3.

Dès qu'un nœud U reçoit une *Fant*, il commence par vérifier s'il est plus proche de la destination que le nœud bloquant K . Si c'est le cas ($|UD| < |KD|$), U renvoie une *Bant*, la phase de récupération est terminée et le routage retourne en mode *greedy*. Sinon, U continue à faire progresser la *Fant*.

Pour transmettre une *Fant*, chaque nœud utilise une règle stochastique basée sur les valeurs de phéromones disponibles pour décider le prochain saut parmi ses voisins. Soit une *Fant* qui arrive à un nœud U . Le nœud U possède k voisins $v_1, v_2,$

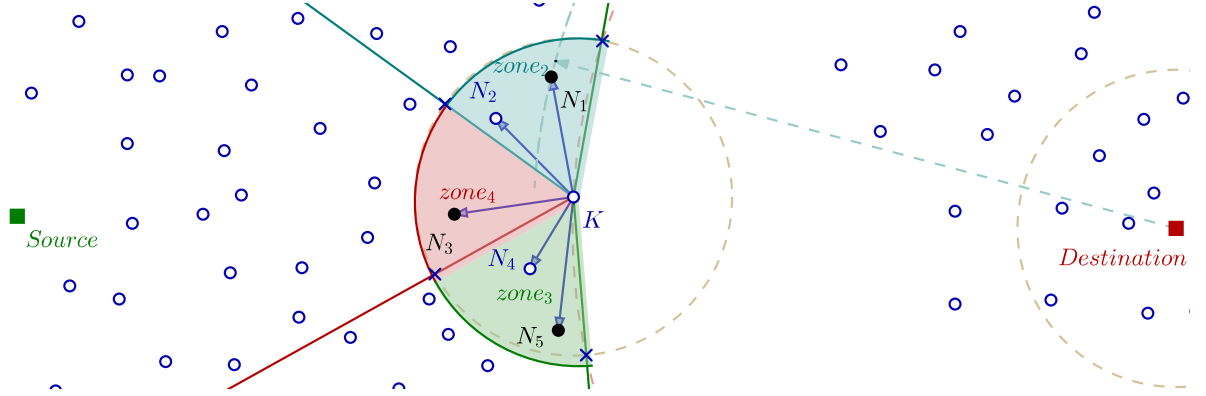


FIGURE 7 – Fant est considérée par le nœud effectuant le meilleur progrès vers la destination dans chaque zone de régression : N_1 de la $zone_2(K)$, N_3 de la $zone_4(K)$ et N_5 de la $zone_3(K)$

Algorithm 3 aco_recovery(K, D) - Exécutez le nœud bloquant K pour déclencher la phase de récupération en diffusant la première *Fant*

- 1: $FANT(K, D) \leftarrow CreateFant()$ ► le nœud bloquant K crée une *Fant*
 - 2: $NextNode_Zone_2 \leftarrow \max_{v \in Zone_2(K)} ||KD| - |vD||$ ► le nœud le plus proche de D dans la $Zone_2$ du nœud bloquant K
 - 3: $NextNode_Zone_3 \leftarrow \max_{v \in Zone_3(K)} ||KD| - |vD||$ ► le nœud le plus proche de D dans la $Zone_3$ du nœud bloquant K
 - 4: $NextNode_Zone_4 \leftarrow \max_{v \in Zone_4(K)} ||KD| - |vD||$ ► le nœud le plus proche de D dans la $Zone_4$ du nœud bloquant K
 - 5: Broadcast($FANT(NextNode_Zone_2, NextNode_Zone_3, NextNode_Zone_4, K, D)$)
-

..., v_k . Nous notons Φ_i la quantité de phéromone assignée à v_i (ou le lien $\overrightarrow{Uv_i}$). Les voisins de U sont divisés en 4 zones. Soit Φ_{zone_i} la valeur maximale de quantités de phéromones attribuées aux voisins de $zone_i$, $\Phi_{zone_i} = \max\{\Phi_j \mid v_j \in zone_i\}$. Afin de choisir le prochain saut pour la *Fant*, U commence par sélectionner une zone avec une probabilité P_{zone_i} calculée en utilisant la formule (1).

$$P_{zone_i} = \frac{\Phi_{zone_i}}{\sum_{j=1}^4 \Phi_{zone_j}} \quad (1)$$

Par la suite, U choisit un nœud v_i parmi ses voisins de la $zone_i$ sélectionnée avec une probabilité P_i calculée en utilisant la formule (2).

$$P_i = \frac{\Phi_i}{\sum_{j=1}^{|N_{zone_i}(D)|} \Phi_j} \quad (2)$$

Dans les algorithmes basés sur l'ACO, les fourmis sont complètement aveugles, elles n'ont aucune connaissance sur l'environnement où elles se trouvent. Dans notre algorithme, nous utilisons du concept des zones pour guider les fourmis. Mais, en utilisant les probabilités, nous maintenons le 3^{ème} principe de la *stigmergie*, elles sont alors attirées, mais pas forcées, par la direction la plus proche de la destination.

En plus de la *PHTable*, chaque nœud maintient une table de retour, notée plus tard *BRTable* pour *back routing table*, qui permet de stocker des informations utilisées plus tard par la *Bant* pour retourner au nœud qui a déclenché la phase de récupération. Lorsqu'une *Fant* arrive à un nœud, un enregistrement est ajouté à la *BRTable*. L'exemple présenté dans la figure 8 décrit les étapes suivies par une *Fant* F_1 essayant de contourner un vide. F_1 est diffusée par le nœud bloquant, puis transmise à travers N_1, N_2, N_3 jusqu'à arriver à N_4 qui est plus proche que K de D , N_4 est appelé nœud débloquent. On appelle nœud débloquent le nœud le plus proche de la destination que le nœud bloquant, autrement dit, il effectue un progrès positif vers la destination par rapport au nœud bloquant. Pour conclure, l'algorithme 4 décrit les étapes de la transmission d'une *Fant* à la recherche d'une route pour sortir de la situation bloquante.

Quand une *Fant* atteint un nœud débloquent N , une fourmi de retour *Bant* est renvoyée vers le nœud bloquant. Après avoir ajouté un enregistrement à la *BRTable*, N extrait les informations de la *Fant*, crée une *Bant* et détruit la *Fant*. Par la suite, N renvoie la *Bant* au nœud bloquant K . Le rôle principal de la *Bant* est de marquer le chemin trouvé en déposant des phéromones sur les liens composant le chemin afin d'établir une piste de K vers N . Au contraste des algorithmes basés sur l'ACO traditionnelle, la *Bant* ne reviendra pas forcément vers le nœud bloquant en utilisant le même chemin suivi par la *Fant* correspondante, mais la fourmi aura le choix d'utiliser les traces de phéromones déposées par d'autres fourmis éclairceuses, *Fants*, qui sont passées par au moins un nœud sur sa trajectoire. Dans l'exemple présenté dans la figure 9, la phase de recherche de route a abouti à deux chemins valides vers un nœud débloquent, le premier présenté en vert est un chemin de 4 sauts et le second marqué en rose est un chemin de 16 sauts. Une *Bant* choisit d'utiliser la piste verte pour revenir à K .

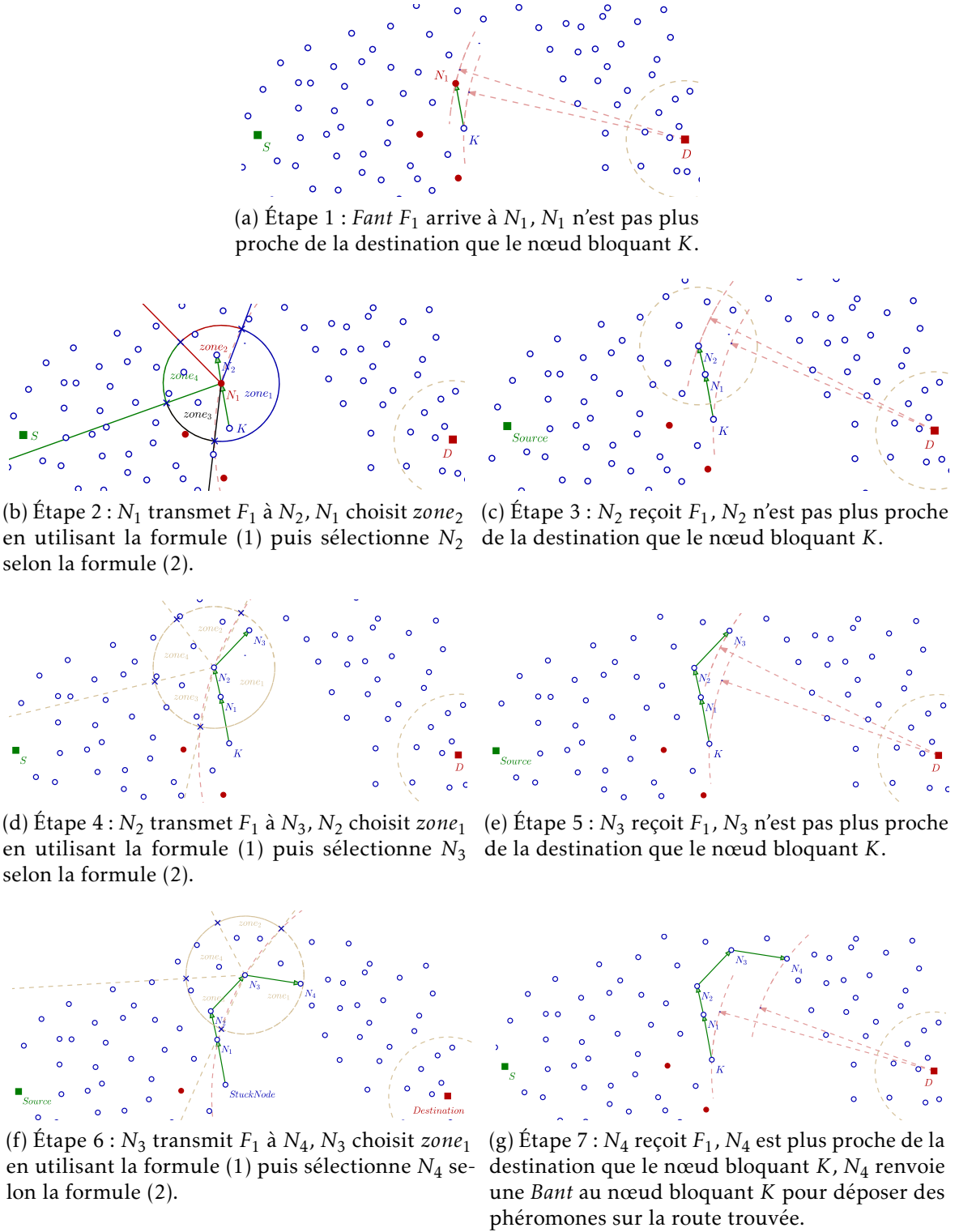


FIGURE 8 – Un exemple d'une *Fant* à la recherche d'un itinéraire autour d'un vide

Algorithm 4 Forward_Fant($FANT(K, D)$) - Exécuté à chaque nœud U à la réception d'une *Fant* destinée à D et émise par le nœud bloquant K

```

1: mettre à jour  $BRTTable(U)$ 
2: if  $|UD| < |KD|$  then {► Le nœud  $U$  permet un progrès par rapport au nœud bloquant et peut
   arrêter le mode de récupération,  $U$  envoie une Bant à  $K$  }
3:    $BANT(K, D) \leftarrow Create\_Bant(FANT(K, D))$  ► Le nœud  $U$  crée une Bant pour la
   renvoyer à  $K$  afin de déposer des phéromones pour  $D$ 
4:   Forward_Bant( $BANT(K, D)$ )
5: else
6:   if  $existPh(U, D) = \text{false}$  then {► s'il n'existe pas des phéromones pour la destination
    $D$ }
7:     Initialisation des phéromones vers  $D$ 
8:   end if
9:   Sélectionner  $NextNode$  en utilisant la formule (1) puis la formule (2)
10:  Send( $FANT(K, D), NextNode$ ) ► transmettre la Fant au nœud  $NextNode$ 
11: end if

```

car il s'agit du chemin le plus court vers K . Sur son chemin de retour vers le nœud bloquant, la *Bant* met à jour les traces de phéromone dans les *PHTables* des nœuds du chemin. Pour une *Bant* arrivant du nœud B au nœud A , la fourmi mettra à jour la piste de phéromone sur le lien \overrightarrow{AB} dans la *PHTable* de A , en utilisant la formule (3).

$$\Phi_{\overrightarrow{AB}} = \Phi_B = \Phi_B + \Delta\Phi \quad (3)$$

avec $\Delta\Phi$ est la quantité de phéromone ajoutée pour renforcer le chemin vers D , cette valeur dépend de la qualité du trajet.

L'algorithme 5 détaille le processus de routage d'une *Bant* sur le chemin de retour.

Afin d'améliorer les performances de GRACO, un nœud bloquant peut déclencher le processus de récupération *ACO based recovery* n fois, avec $0 \leq n \leq n_{max}$, s'il ne reçoit pas de fourmi de retour *Bant* au bout d'un certain temps.

Généralement, les algorithmes basés sur l'ACO sont fondés sur l'équilibre entre deux processus : l'intensification (dépôt de phéromones) et l'évaporation. La règle d'évaporation est utilisée pour réduire l'effet des anciennes phéromones. Ainsi, pour chaque nœud U , les phéromones pour chaque voisin v_i sont évaporées périodiquement selon la formule (1).

$$\Phi_i = \Phi_i * (1 - \alpha) \quad (4)$$

avec α est le taux d'évaporation de phéromones, $0 < \alpha < 1$.

Multiples récupérations pour la même destination

Sur son chemin vers sa destination finale, un paquet peut tomber dans plusieurs impasses sur un même chemin, pour cette raison, dans de tels cas, le mode de récupération sera lancé à plusieurs reprises. Afin de réduire l'effet de anciens modes de récupération, la quantité de phéromones ajoutée à une *PHTable* sera marquée par le rang du mode de récupération actuel. Une *Fant* va utiliser seulement les phéromones ayant le rang du mode récupération qui l'a déclenché pour décider le prochain saut. Une *Bant* retournant pour marquer le chemin trouvé, va supprimer les anciennes pistes de phéromones trouvées sur son chemin. Ainsi, un nœud qui a reçu les fourmis de différents recouvrements, aura, à la fin, seulement les phéromones de la phase de récupération la plus récente dans sa *PHTable*.

La figure 10 présente un exemple de lancers dans le chemin d'une source S vers une destination D. La figure 10a illustre le premier mode de récupération lancé, les fourmis trouvent au cours de cette phase deux chemins vers deux nœuds débloquent. Le paquet de données sera transmis en utilisant l'un de ces deux chemins. Si le paquet de données utilise le chemin rose, il atteint un autre nœud bloquant, un second mode de récupération est donc lancé. La nouvelle *Fant* utilisera seulement les phéromones qu'elle a déposées, sinon, elle ne peut pas sortir du nœud bloquant puisque les phéromones déposées sur la piste marquée en rose sont plus fortes que les phéromones initiales de la deuxième phase de récupération. Lors de la deuxième phase de récupération, un chemin vers un nœud débloquent a été trouvé, ce chemin est marqué en bleu dans le figure 10b. Dans ce cas, les phéromones déposées lors de la première phase de récupération ne sont plus utiles. La nouvelle *Bant* supprime alors les anciennes traces de phéromones et ajoute les nouvelles. La prochaine fois que le nœud source S décide d'envoyer un paquet à D, ce dernier sera transmis en utilisant le routage glouton jusqu'au nœud N et puis en utilisant les traces de phéromones, comme présenté dans la figure 10c.

Gestion des boucles

En utilisant le principe d'aspect aléatoire du concept de la *stigmergie*, une *Fant* peut entrer dans une boucle dans la phase d'établissement de l'itinéraire. Afin d'éviter ça, le protocole GRACO propose un processus pour détecter et gérer les boucles. L'idée principale consiste à marquer le paquet en boucle et le faire revenir en arrière jusqu'à trouver un chemin alternatif et sortir de la boucle. Ce mécanisme tente de gérer les boucles tout en minimisant les retours en arrière, en effet, on retourne en arrière seulement quand on n'a plus d'autres solutions afin de garantir dans tous les cas la livraison du paquet. C'est ainsi

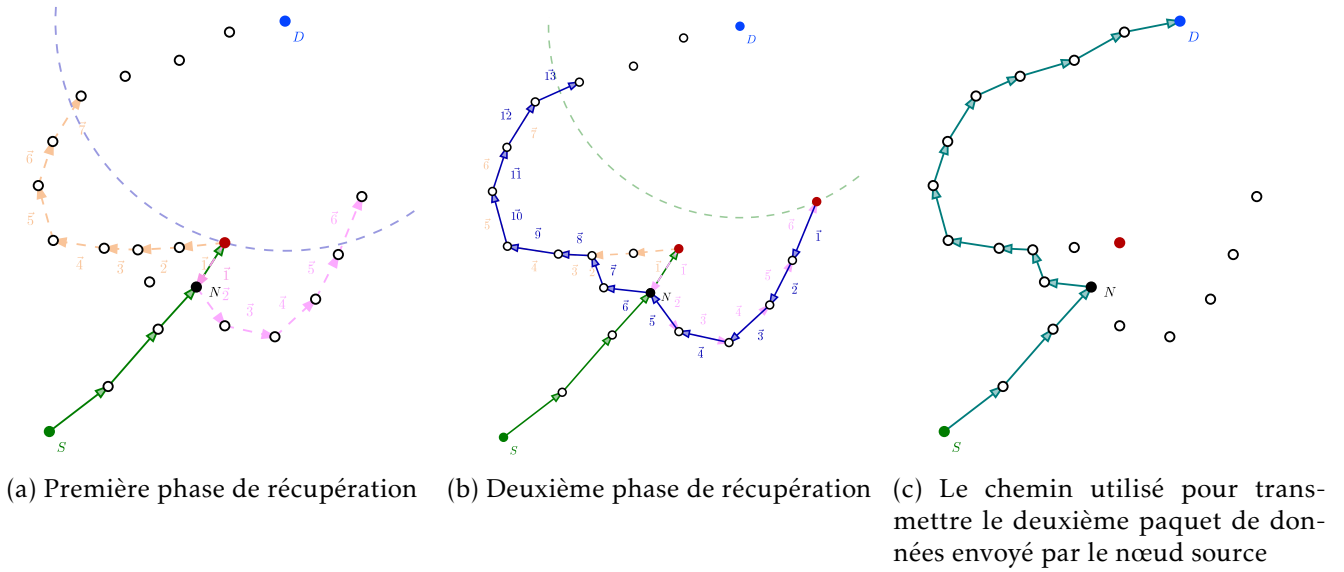


FIGURE 10 – Multiples récupérations pour une destination D

que, lorsqu'un nœud détecte une *Fant* dans une boucle pour la première fois, il marque le paquet en lui attribuant un indicateur de boucle. L'indicateur de boucle, est un bit dans le paquet initialisé à 0, et passé à 1 quand le paquet entre en boucle, cela présente donc un coût minime. Ensuite, le nœud renvoie le paquet au précédent. En effet, dans un premier temps, le mécanisme de gestion de boucle tente la solution la plus simple en annulant la boucle, cela suffit dans la plupart des temps. Dans un deuxième temps, tout nœud qui reçoit une *Fant* avec un indicateur de boucle, essaie de faire sortir le paquet de cette boucle en l'envoyant à un autre nœud que le précédent. Si cela est impossible, la *Fant* revient en arrière jusqu'à trouver une issue. Le retour en arrière se fait en utilisant les informations stockées dans la *BRtable*. Une fois que la *Fant* sort de la boucle, le fanion de boucle est supprimé, le processus de routage du paquet revient à la normale. Dans le cas où la *Fant* retourne au premier nœud qui a détecté la boucle, le paquet sera annulé.

La figure 11a illustre une exemple de *Fant* F1 qui entre dans la boucle de ABC. Le mécanisme de gestion de boucles de GRACO permet F1 de sortir de la boucle ABC en suivant les étapes suivantes :

- (a) ① Le nœud A reçoit F1, A détecte que F1 est déjà passé par lui en se basant sur un enregistrement précédemment mémorisé dans sa *BRtable* pour la même fourmi. Étant donné que A est le premier nœud à détecter F1 en boucle, il affecte un indicateur de boucle à F1. A n'enregistre pas les informations de la fourmi dupliquée dans sa

BRTTable. Ensuite, A fait revenir le paquet au nœud précédent C.

- (b) C reçoit F1 et reconnaît que la F1 est en boucle en se basant sur l'indicateur de boucle,
 - ② C efface le lien vers le nœud précédent (A),
 - ③ C tente d'envoyer F1 hors de la boucle, il va donc essayer de trouver un voisin hors de la boucle pour transmettre F1. Puisque A n'est plus considéré (le lien est désactivé) et B figure dans la *BRTTable* de C (ce qui signifie F1 déjà passé de B), C n'arrive pas à renvoyer F1 hors de la boucle, il décide alors de retourner la fourmi au nœud précédent (B). C envoie F1 à B.
 - ④ C supprime B de sa *BRTTable*.
- (c) B reçoit F1 et reconnaît que la F1 est en boucle en se basant sur l'indicateur de boucle,
 - ⑤ B efface le lien vers le nœud précédent (C),
 - ⑥ B tente d'envoyer F1 hors de la boucle. Puisque C n'est plus considéré (le lien est désactivé) et A figure dans la *BRTTable* de B (ce qui signifie que F1 est déjà passé par A), B ne peut pas renvoyer F1 hors de la boucle, il décide alors de renvoyer la fourmi au nœud précédent (A). B renvoie F1 à A.
 - ⑦ B supprime l'enregistrement de F1 de sa *BRTTable*.
- (d) A reçoit F1 pour la 3^{ème} fois,
 - ⑧ A efface le lien vers le nœud précédent (B),
 - ⑨ A supprime F1.

En désactivant les liens menant à la boucle, les prochaines fourmis n'arriveront pas à la même situation. En effet, en effaçant ces traces de phéromones des *PHTables*, les nœuds correspondant ne seront plus pris en compte dans le processus de sélection des prochains sauts. De même, la suppression des enregistrements de la *BRTTable* empêchera les *Bants* de boucler dans leur chemin de retour.

Le mécanisme de gestion de la boucle de GRACO est décrit dans la figure 12.

Évaluation des performances

Afin d'évaluer l'algorithme GRACO, nous choisissons d'utiliser le simulateur WSNET [57]. WSNET est un simulateur à événements discrets modulaire capable de simuler des réseaux sans fil et multi-sauts. Il fournit une implémentation réaliste des couches physique et liaison (MAC).

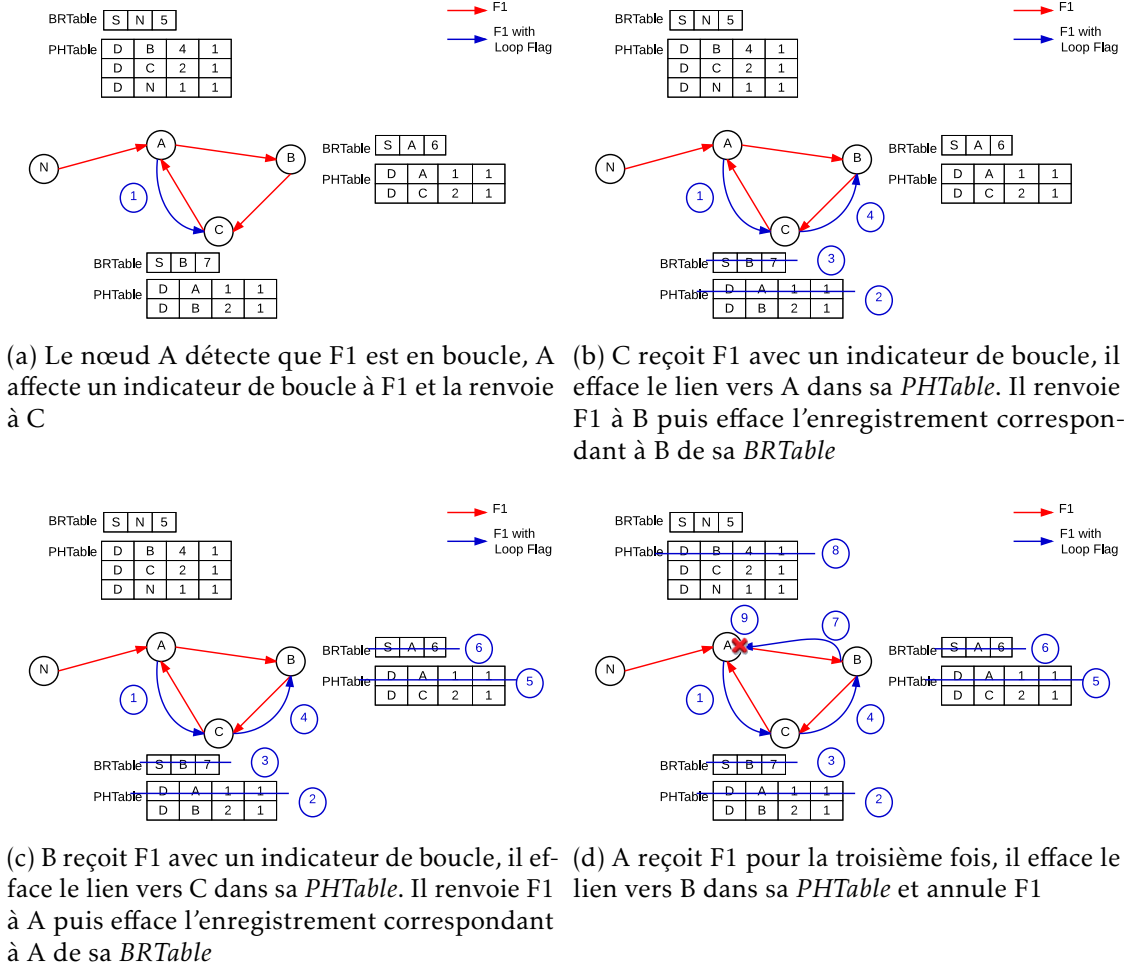


FIGURE 11 – Détection et gestion d'une boucle

Dans nos simulations, nous considérons deux versions de GRACO. La première essaie de minimiser les coûts de routage tout en maintenant un bon niveau de performance, en effet, pour une étape de récupération, si aucune *Bant* n'est retournée au nœud bloquant au bout d'un intervalle de temps $T = 1ms$, il est permis de relancer une autre série de 3 fourmis une seule fois, N_{max} est alors mis à 1. La deuxième variante du GRACO garantit la livraison, le nœud bloquant enverra alors un ensemble de 3 fourmis périodiquement tant qu'aucune *Bant* n'est revenue. Dans ce qui suit, nous notons $GRACO_V_1$ où $N_{max} = 1$ et $GRACO_V_2$ lorsque $N_{max} \rightarrow \infty$.

Pour une évaluation des performances équitable, nous choisissons de comparer notre algorithme de routage à GFG [29]. GFG est connu pour garantir la livraison

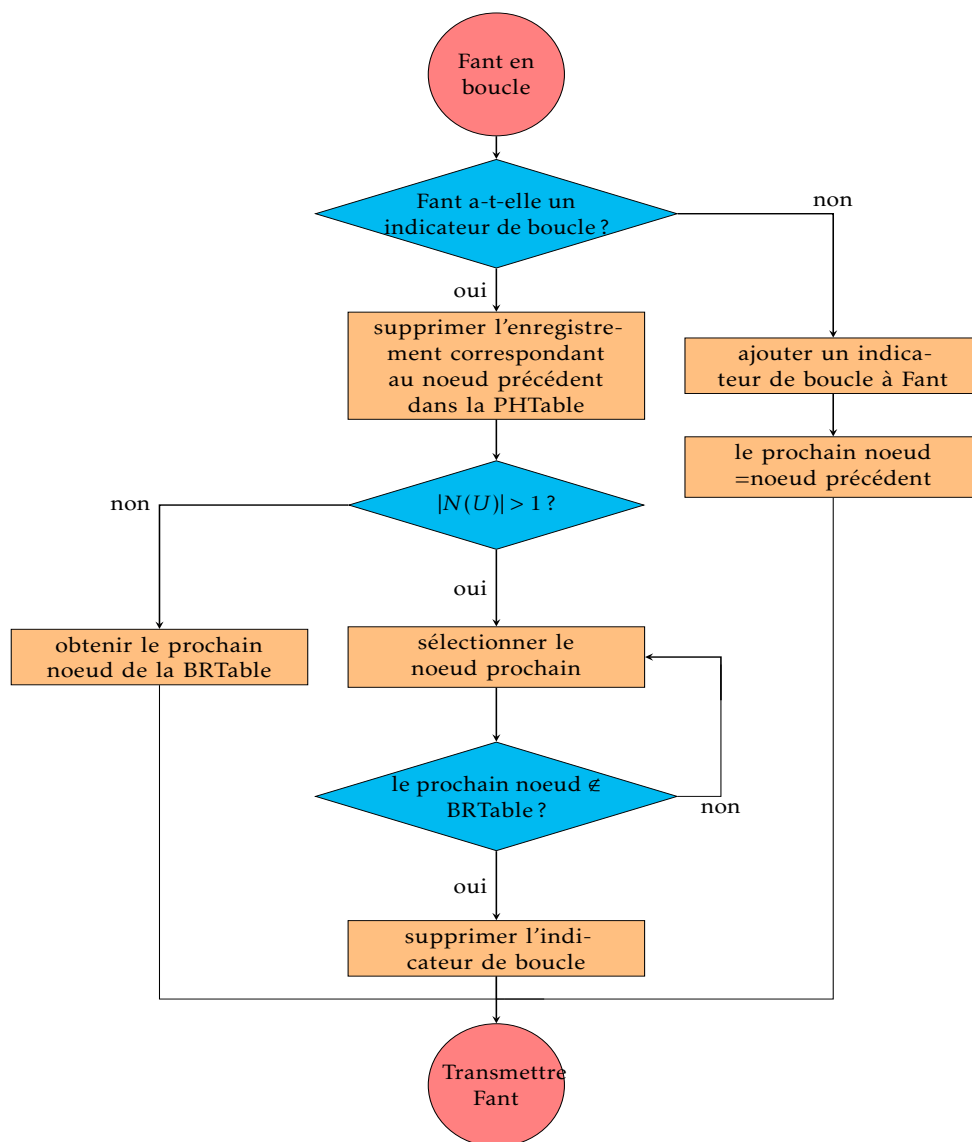


FIGURE 12 – Gestion des boucles

dans les réseaux statiques et suffisamment denses [32], cela signifie que si un chemin existe, GFG le trouve certainement, bien qu'il ne garantisse pas des chemins optimaux car il peut générer de longs détours dans certains cas [58]. D'ailleurs, comme déjà dit dans le chapitre I, GFG étant un protocole de routage qui combine un acheminement glouton ordinaire et une technique de récupération basée sur la construction de graphe planaire, a une faible complexité comparé à des protocoles de routage utilisant des techniques de récupération des autres catégories qui garantissent la livraison [23][59]. L'algorithme proposé ne garantit pas la convergence vers le plus court chemin, car nous limitons le nombre des fourmis éclaireuses utilisées. Mais compte tenu de la nature dynamique des réseaux abordés, nous considérons qu'il vaut mieux obtenir un chemin de routage efficace plutôt que de dépenser plus de ressources pour trouver le chemin le plus court qui sera probablement pas utile après certain temps puisque la topologie du réseau est très dynamique et subit des changements fréquents dus au caractère diffusant du médium radio, surtout en milieu urbain. Nous avons généré des topologies aléatoires connectées dont le nombre des nœuds varie de 250 à 900 dans une surface de $300\text{ m} \times 300\text{ m}$ pour obtenir des réseaux de degrés allant de 5 à 19 voisins/nœud. Les nœuds ont une portée de communication de 25 m. Les topologies contiennent nécessairement des trous de communications de tailles, formes et emplacements aléatoires. Dans chaque topologie, nous choisissons aléatoirement un ensemble de dix sources et destinations, de telle façon que la phase *greedy* aboutira nécessairement à, au moins, une impasse. Ainsi, lors d'une simulation, la phase de récupération est déclenchée au moins une fois. Les paramètres de simulation sont résumés dans le tableau 8.

Paramètre	Valeur
Durée (s)	300
Routage	GFG et GRACO
MAC	couche MAC idéale et MAC IEEE 802.15.4 CSMA-CA
Radio	half-duplex
Interférences	aucune
Modulation	bpsk
Taille du domaine	$300\text{ m} \times 300\text{ m}$
Portée de communication	25m
Nombre des nœuds	250, 350, 450, 550, 650, 750, 850, 900
Densité	5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19

TABLEAU 2 – Paramètres de simulation

Les performances de GRACO sont principalement mesurées en termes de taux de livraison, nombre de messages de contrôle, délai d'envoi de données et longueurs des chemins de routage (en termes de nombre de sauts) afin de mesurer la robustesse et l'efficacité du protocole. En outre, nous mesurons le coût global de livraison de données, y compris le coût de récupération. Nous avons comparé les performances de GRACO et GFG en deux étapes. Nous avons commencé en simulant les performances de $GRACO_V_1$ et $GRACO_V_2$ avec une couche MAC idéale, donc aucune collision n'est simulée. Le choix d'utiliser une couche MAC Idéale a été fait pour mesurer uniquement l'impact des algorithmes de routage. Dans une deuxième étape, nous avons comparé le fonctionnement de $GRACO_V_2$ et GFG avec une couche MAC plus réaliste *i.e* IEEE 802.15.4 unslotted CSMA/CA avec une configuration standard. Nous avons choisi de simuler seulement $GRACO_V_2$ car il réalise un meilleur taux de livraison que $GRACO_V_1$ avec un coût raisonnable.

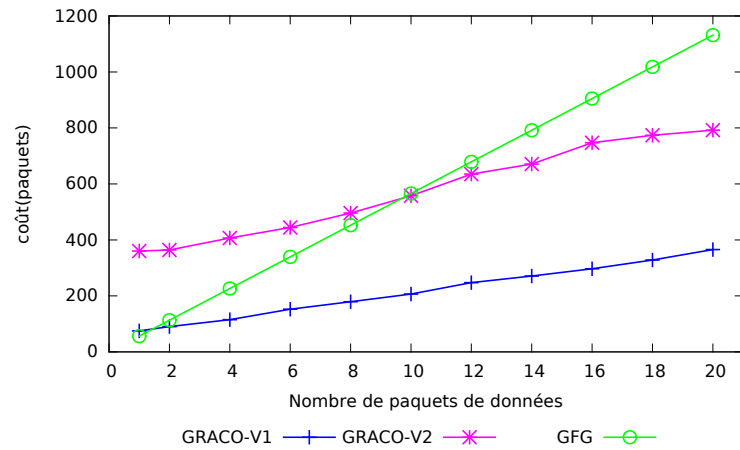
Les résultats de simulation de GRACO et GFG sont donnés avec un intervalle de confiance de 95%.

Coût de livraison

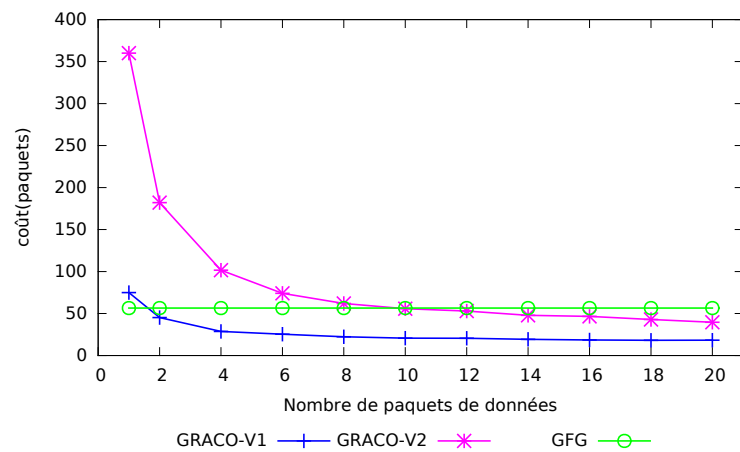
Le coût de livraison de données est comptabilisé comme étant le nombre total de paquets envoyés dans le réseau pour délivrer les données d'une source vers une destination, y compris les paquets des données et de contrôle. Les messages de contrôle sont les messages *HELLO* utilisés pour échanger des informations entre les voisins et les paquets *Fants* et *Bants* utilisés pour établir un chemin lors d'une phase de récupération.

La figure 13a montre le coût de la livraison de données en fonction du nombre de paquets de données envoyés pour une couche MAC idéale. Ainsi, seuls la longueur des routes et les recouvrements lors des rencontres des vides influencent ce coût. Le coût de $GRACO_V_2$ est nettement plus élevé que $GRACO_V_1$ puisque les cas où $GRACO_V_1$ ne trouve pas un chemin après 2 itérations de lancers de *Fants*, $GRACO_V_2$ continue à lancer des *Fants* jusqu'à qu'il trouve un chemin, ainsi le nombre de fourmis utilisées dans $GRACO_V_2$ est plus grand que $GRACO_V_1$. Au début, GFG semble utiliser moins de paquets pour délivrer les données que GRACO, mais lorsque le nombre de paquets de données envoyés augmente, le coût de GFG augmente rapidement. $GRACO_V_1$ utilise moins de paquets à partir du deuxième paquet de données envoyé. Cependant, $GRACO_V_2$ devient moins coûteux que GFG à partir du 10^{ème} paquet de données transmis entre la même source et la même destination.

En utilisant une couche MAC réaliste (IEEE 802.15.4 MAC), le coût inclut le coût des retransmissions. Les simulations effectuées avec la couche MAC réaliste montrent des résultats similaires. Comme représenté dans la figure 14a, le coût



(a) Coût de transmission en fonction du nombre de paquets de données envoyées



(b) Coût de transmission par paquet en fonction du nombre de paquets de données envoyées

FIGURE 13 – Coût de transmission - couche MAC idéale

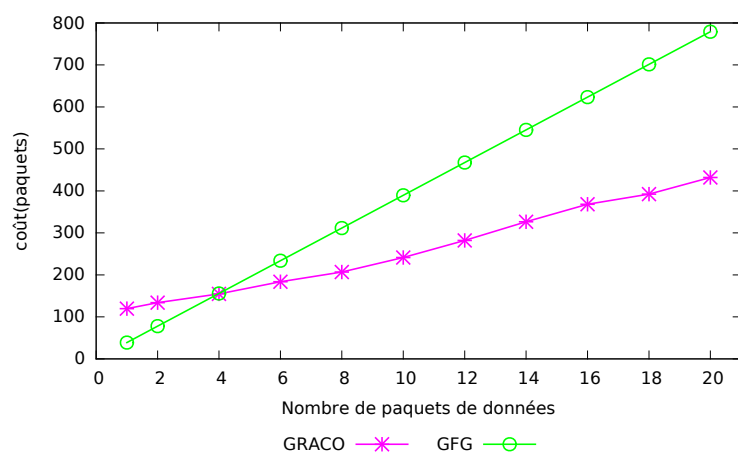
total de GFG est inférieur à celui de $GRACO_V_2$ au début, mais à partir du 4^{ème} paquet de données envoyé, le coût de GFG devient beaucoup plus élevé que celui de $GRACO_V_2$.

Les simulations ont montré que lorsque le nombre de paquets de données envoyés entre la même source et la même destination augmente, le coût de GRACO diminue en comparaison à celui de GFG. Ces résultats sont expliqués par le fait que le nombre de paquets envoyés au cours de la phase de récupération de GRACO est plus grand que dans celle de GFG. Toutefois, lorsque le nombre de paquets de données envoyés entre la même source et la même destination augmente, GRACO devient moins coûteux que GFG puisque GRACO lance le mode de récupération uniquement pour le premier paquet de données, les paquets suivants vont utiliser les routes déjà établies et suivre les traces de phéromones existantes. En ce qui concerne GFG, il lance le mode de récupération à chaque fois qu'un paquet de données est envoyé. Ainsi, le coût de GRACO pour plusieurs paquets entre la même source et la même destination est le même que pour celui d'un seul paquet, contrairement à GFG pour lequel le coût utilisé pour délivrer plusieurs paquets de données sera le coût d'envoi d'un seul paquet multiplié par le nombre de paquets de données envoyés puisqu'il est sans mémoire, il suit toujours la même route et effectue toujours le même algorithme. Sur les figures 13b et 14b, on peut remarquer que le coût par paquet diminue lorsque le nombre de paquets de données augmente. De l'autre côté, le coût de GFG pour livrer un seul paquet reste constante.

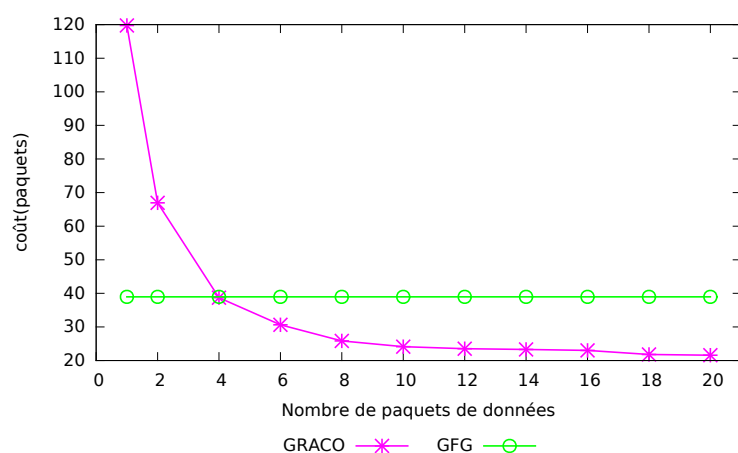
Longueur des routes

La figure 15 représente les longueurs moyennes des routes suivies par les paquets de données acheminés avec succès. Nous notons que le protocole GRACO crée des chemins plus courts que ceux établis par GFG. GFG peut générer des chemins extrêmement longs dans certains cas [58], en particulier dans les réseaux de faibles densités comme le montre la figure 15. En revanche, l'ACO et le concept des zones utilisé dans GRACO aide l'algorithme à créer des routes plus courtes que celles créées par GFG.

Afin de mettre en valeur l'aspect *multi-chemin* de la stratégie de récupération utilisée dans GRACO, nous comptons le nombre de chemins trouvés par GFG et GRACO. Comme présenté dans la figure 16, GFG utilise le même chemin dans toutes les itérations, cependant, GRACO est capable de trouver plusieurs chemins si possible, grâce à l'envoi simultané de 3 fourmis exploratrices à chaque recouvrement. Dans certains cas, GRACO n'arrive à trouver qu'un seul chemin d'accès pour toutes les itérations. Ceci s'explique par le fait que c'est le seul chemin possible.



(a) Coût de transmission en fonction du nombre de paquets de données envoyées



(b) Coût de transmission par paquet en fonction du nombre de paquets de données envoyées

FIGURE 14 – Coût de transmission - 802.15.4 MAC

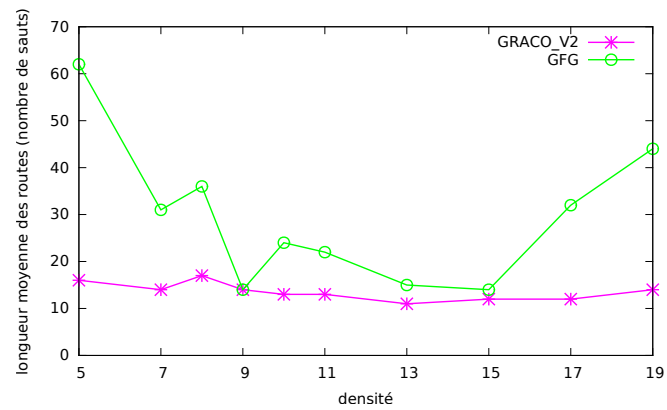


FIGURE 15 – Longueur moyenne des routes

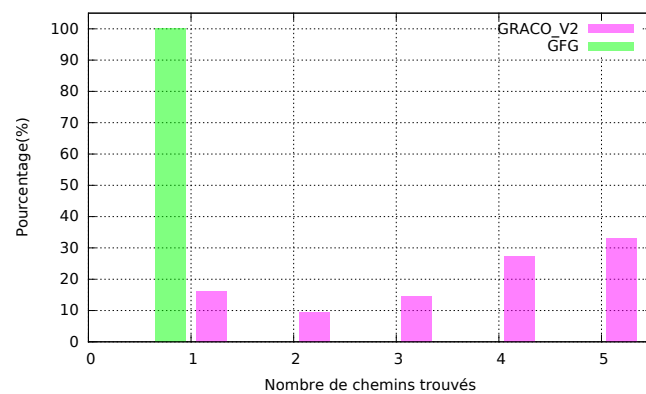


FIGURE 16 – Nombre de routes

Délai de bout-en-bout

Le délai de bout-en-bout représente la durée à partir du moment un paquet est prêt pour la transmission dans le nœud source jusqu'à ce qu'il soit reçu et décodé correctement dans sa destination finale. Dans le cas d'un ensemble de paquets de données, le délai de bout-en-bout représente l'intervalle de temps entre l'instant où la source envoie le premier paquet de données et celui où la destination reçoit le dernier.

Les figures 17 et 18 montrent le délai de bout-en-bout en fonction du nombre de paquets de données envoyés avec, respectivement, une couche parfaite et une couche MAC réaliste IEEE 802.15.4. Nous observons que le délai de bout-en-bout mesuré pour l'algorithme GFG est toujours plus élevé que celui mesuré avec GRACO. Ceci est principalement dû au fait que GFG tente de créer un chemin autour du vide à chaque fois qu'un paquet essaie de le traverser, même si le paquet a la même source et la même destination que le précédent. Cependant, GRACO lance la récupération uniquement la première fois lorsque le paquet essaie de contourner le vide, puis les paquets suivants utilisent les traces de phéromones déposées pour les chemins trouvés lors de l'ancienne phase de récupération. Lorsque le nombre de paquets de données transmis augmente, la différence entre le délai de bout-en-bout mesuré avec GFG et celui mesuré avec GRACO devient plus importante.

En outre, comme montré dans le paragraphe I, GRACO crée généralement des routes plus courtes que celles trouvées par GFG, ainsi GRACO délivre les paquets données plus rapidement que GFG. Ceci a plus d'impact quand on utilise une couche MAC réaliste, en effet, plus la route est courte, on a moins de chance de pertes de paquets de données, et ainsi moins de retransmissions au niveau de la couche MAC, ce qui réduit significativement le délai de bout-en-bout. Ainsi, GRACO délivre les paquets de données plus rapidement que GFG.

Taux de livraison

Le taux de livraison de paquets est le rapport entre le nombre de paquets de données reçus avec succès par les destinations et le nombre de paquets de données envoyés par les sources.

$$\text{Taux de livraison} = \frac{\text{Nombre de paquets de données recus par la destination}}{\text{Nombre de paquets de données envoyés par la source}}$$

La figure 19 compare les taux de livraison des données de GRACO_V1, GRACO_V2 et GFG mesurés avec une couche MAC idéale. Nous observons sur cette figure que pour une couche MAC idéale, les deux variantes de GRACO : GRACO_V1 et GRACO_V2 montrent un écart de performance de 8%. En effet, le taux de livraison pour GRACO_V2 est 100%, alors que GRACO_V1 délivre dans le pire des

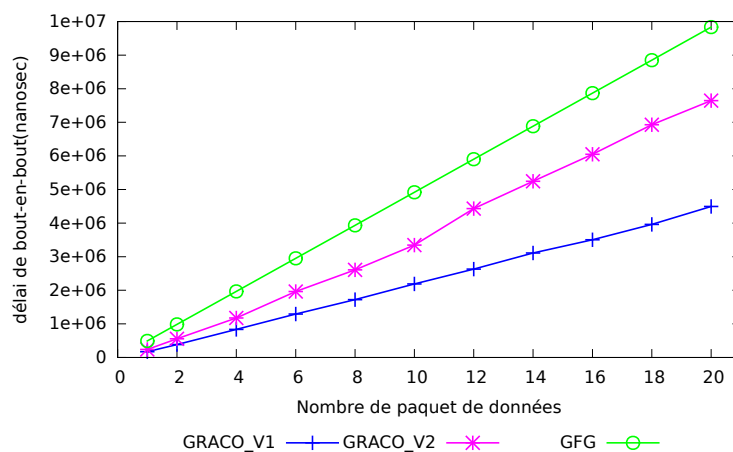


FIGURE 17 – Le délai de bout-en-bout en fonction du nombre de paquets de données envoyés - couche MAC parfaite

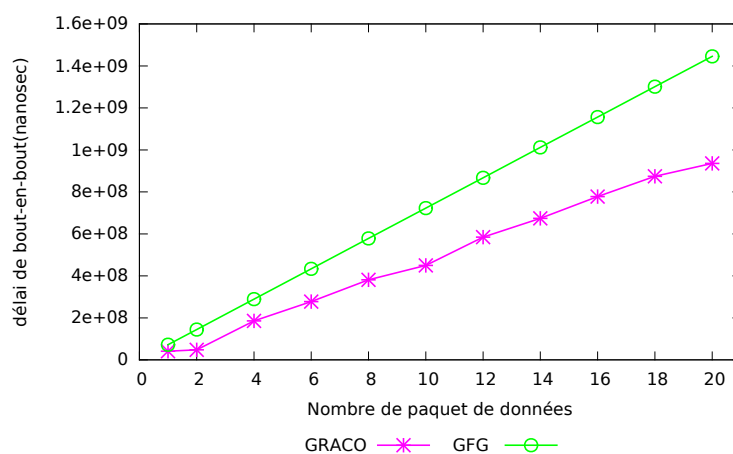


FIGURE 18 – Le délai de bout-en-bout en fonction du nombre de paquets de données envoyés - couche MAC IEEE 802.15.4

cas environ 92% des paquets. Ce comportement s'explique par le fait de procéder dans l'envoi des fourmis éclaireuses jusqu'à aboutir à une route dans $GRACO_V_2$, tandis que, pour $GRACO_V_1$, un ensemble de 3 fourmis éclaireuses est transmis au maximum 2 fois pour une seule phase de récupération. De l'autre côté, GFG délivre 100% des données envoyées. Ainsi, $GRACO_V_2$ garantit la livraison des données mais avec un coût supplémentaire par rapport à $GRACO_V_1$, cependant, il reste moins coûteux que GFG en termes de délai de bout-en-bout et le nombre de messages utilisés pour l'acheminement des données, spécialement quand le nombre des paquets de données envoyés augmente.

Pour $GRACO_V_1$ dans certains cas rares, les fourmis éclaireuses, *Fants*, se

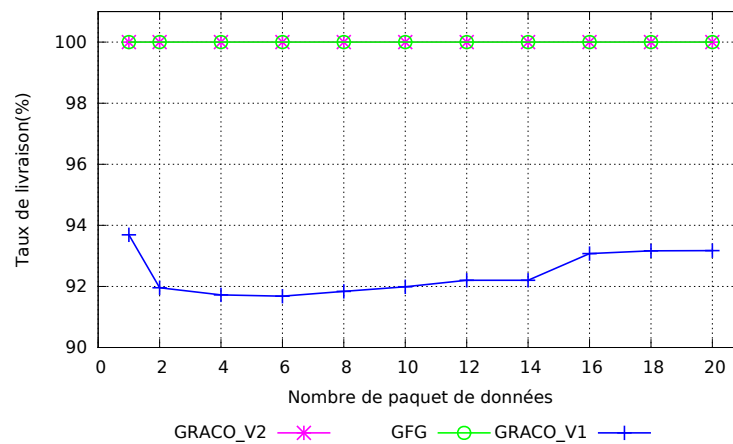


FIGURE 19 – Le taux de livraison en fonction du nombre de paquets de données envoyés - couche MAC idéale

perdent dans le réseau, spécialement dans le cas des réseaux avec plusieurs vides, et ceci est dû au facteur aléatoire dans la décision stochastique du choix du prochain saut. Même lorsque le premier paquet de données est délivré à sa destination avec succès, les pistes de phéromones déposées pendant les phases de récupération lancées pour acheminer le premier paquet autour des impasses vont influencer sur les paquets de données suivants, ce qui explique le fait que le taux du premier paquet de données de livraison est toujours plus élevé que plusieurs paquets de données. Cependant, l'effet de ces pistes de phéromones sera réduit avec le temps en raison de l'évaporation des phéromones. En effet, le processus d'évaporation des phéromones est un facteur important dans la méta-heuristique ACO, il aide à éliminer les traces de phéromone qui peuvent induire en erreur les fourmis, puis d'adapter à la nature dynamique de l'environnement. Ainsi, au bout d'un certain temps, les mauvaises pistes de phéromones seront totalement évaporées et des nouvelles voies seront trouvées. Cela dépend

du facteur d'évaporation et de l'intensité des phéromones déposées. Pour cette raison, nous pouvons voir dans la figure 19 que le taux de livraison commence à augmenter à nouveau quand le temps s'écoule pour les prochains paquets de données transmis.

La figure 20 illustre le taux de livraison de données en fonction du nombre de paquets de données envoyés pour une couche réaliste : IEEE 802.15.4 MAC. En raison de collisions de paquets mesurées par la couche MAC IEEE 802.15.4, les taux de livraison des données de GFG et GRACO se dégradent. Cependant, le taux de GFG de livraison est plus affecté que $GRACO_V_2$, en effet, GFG délivre moins de 80 % des données, tandis que $GRACO_V_2$ maintient un taux de livraison haut, proche de 90 %. Ce comportement peut être expliqué par le fait que GFG utilise des routes plus longues que celles utilisées par GRACO ce qui augmente la chance de pertes de paquets.

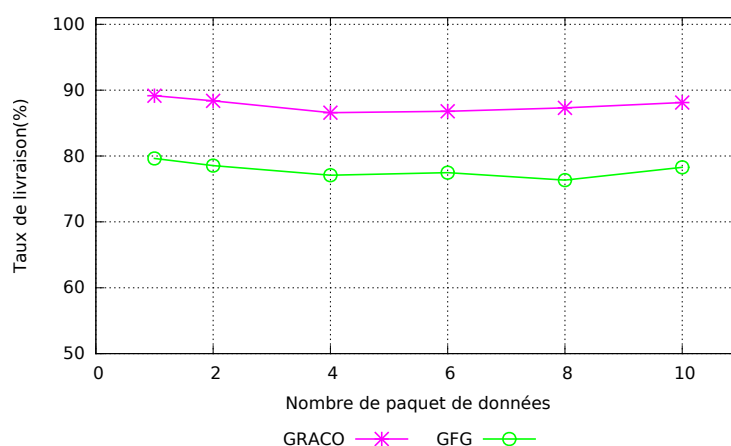


FIGURE 20 – Taux de livraison en fonction du nombre de paquets de données envoyés - couche MAC IEEE 802.15.4

Discussion sur l'utilisation de mémoire

GRACO n'est pas un algorithme de routage sans mémoire contrairement à GFG. En effet, comme expliqué dans la section I, la phase de récupération basée sur l'ACO est accomplie en utilisant les pistes de phéromones, ces traces seront mémorisées dans les *PHTables* des nœuds appartenant aux chemins de récupération. Un nœud stocke dans sa *PHTable* les pistes de phéromones sur ses liens sortants. Si un nœud appartient à plusieurs chemins de récupération pour des destinations différentes, il conserve les traces de phéromones pour chacune de ces destinations. Cependant, toutes les traces de phéromones s'évaporent

périodiquement, les traces non-mises à jour seront supprimées plus rapidement que celles renforcées, ainsi, progressivement, un nœud aura seulement les phéromones mises à jour dans sa *PHTable*.

Outre que les *PHTables*, tout nœud appartenant à un chemin de récupération stocke une *BRtable* pour aider les *Bants* à revenir au nœud bloquant. Chaque enregistrement dans la *BRTable* sera supprimé après un intervalle de temps égal à la durée maximale estimée d'une phase de recouvrement car ces données ne seront plus utiles quand la phase de recouvrement est terminée.

Pour assurer le processus de gestion de la boucle, chaque nœud mémorise les identifiants des *Fant* reçues afin de reconnaître les *Fants* dupliquées. Le nœud supprimera ces informations après un intervalle de temps égal à la durée de vie de la *Fant*.

Pour conclure, GRACO n'est pas un protocole de routage sans mémoire contrairement à GFG puisque les nœuds appartenant aux chemins de récupération stockent des informations locales sur les traces de phéromone pour chacun de ses liens sortants, les informations de chemins de retour des *Bants* et les identifiants des *Fants* pour la gestion de la boucle. Toutefois, ces informations sont volatiles, et seront supprimées après un certain temps, car elles ne sont utiles que pour une courte durée. De plus, la combinaison mode glouton-mode recouvrement permet d'équilibrer l'efficacité du processus du routage vis-à-vis le coût utilisé pour permettre cette efficacité. En effet, la quantité des données à stockées est inversement proportionnelle à la densité du réseau. Dans les réseaux denses, on a généralement moins de zones vides, donc moins de phases de recouvrement seront déclenchées, et ainsi moins d'informations à stocker. Alors que dans les réseaux peu denses, on utilise plus le mode recouvrement car les zones vides sont fréquentes, mais ceci est effectué avec un coût minime en terme d'utilisation de mémoire car généralement dans les réseaux peu denses, les nœuds ne disposent pas de nombreux voisins. En revanche, les résultats des simulations ont montré que GRACO surpasse GFG en termes de coût de routage de données, délai de bout-en-bout, le taux de livraison des données et la longueur des trajectoires générées. En outre, la stratégie de récupération proposée crée des trajets multiples autour du vide.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit GRACO, un nouveau protocole de routage géographique pour les réseaux de capteurs sans fil capable de gérer efficacement le problème des zones vides avec une très faible complexité additionnelle. GRACO combine une phase gloutonne assistée par des traces de phéromones, appelée *ph-assited greedy forwarding*, et une phase de récupération

basée sur l'ACO qui permet de contourner les vides pour restaurer autant que possible le routage *greedy* entre la source et la destination. GRACO est entièrement localisé, distribué, évolutif, et ne nécessite pas de créer ou maintenir une structure de graphe. Les nœuds, qui font partie des chemins de récupération, ont besoin de stocker des informations locales sur les traces de phéromone, routage de retour et la gestion de la boucle. Cependant, toutes ces informations sont stockées uniquement pour une courte période, en effet, le facteur d'évaporation réduit les informations des phéromones, et les autres informations stockées seront supprimées lorsqu'elles ne sont plus utiles.

Outre le contournement des impasses, les résultats des simulations avec une couche MAC idéale montrent que les deux variantes de GRACO, $GRACO_{V_1}$ et $GRACO_{V_2}$, transmettent les paquets de données plus rapidement et avec un coût moindre par rapport au protocole de routage GFG. $GRACO_{V_1}$ assure un taux de livraison élevé avec un coût minimum, tandis que $GRACO_{V_2}$ garantit la livraison des données avec un surcoût par rapport à $GRACO_{V_1}$ en termes de délai de bout-en-bout et nombre de messages de contrôle. Par contre, ce surcoût reste moindre que celui généré par GFG pour garantir livraison. Les résultats de simulation avec une couche MAC réaliste (IEEE 802.15.4 MAC) ont montré que GRACO surpasse GFG en termes de délai de bout-en-bout, coût de la livraison de données en messages et taux de livraison. Après avoir prouvé l'efficacité de GRACO pour les réseaux de capteurs en général, nous proposons l'utilisation de GRACO comme une solution de routage pour les réseaux Smart Grid Neighborhood Area Network (NAN).

Dans la deuxième partie de cette thèse, nous nous concentrons sur le cas particulier des réseaux SG NAN. Pour ce fait, nous commençons par dresser l'état de l'art du concept SG, ensuite, nous analysons les exigences en communication des réseaux NAN afin de montrer la pertinence du routage géographique en général, et du GRACO en particulier, pour ce type particulier de réseau.

Deuxième partie

Routage géographique dans les réseaux de capteurs et actionneurs sans fil dans les smart grids

*

Smart Grids : Les réseaux électriques intelligents

Dans la deuxième partie de la thèse, nous nous concentrons sur le cas particulier des réseaux de capteurs dans les réseaux électriques intelligents. Pour ce fait, dans ce chapitre, nous présentons l'état de l'art du concept de Smart Grid (SG) lié à la thèse. Nous commençons par présenter le concept du réseau d'électricité conventionnel et intelligent pour mettre en évidence les éléments ajoutés dans le processus de mutation vers le SG. Ensuite, nous nous focalisons sur la couche communication, nous décrivons ainsi les différents réseaux ainsi que les technologies de communications proposés. Enfin, nous présentons les applications et services qui devront être supportés par l'infrastructure de communication.

Réseau d'électricité conventionnel

Dans les réseaux d'électricité conventionnels plutôt centralisés et unidirectionnels, l'électricité est distribuée selon un mode immuable et dans un seul sens : depuis les sites de production vers les consommateurs. En effet, le réseau d'électricité conventionnel est un système hiérarchique composé de trois sous-systèmes distincts : la production, le transport et la distribution. Les centrales électriques produisent de l'électricité. Dans les sous-stations de transmission, des transformateurs élévateurs transforment l'électricité en haute tension afin de limiter les pertes lors de la transmission à longue distance sur le réseau de transmission. Ensuite, dans les sous-stations de distribution, l'électricité à haute tension est transformée en moyenne tension et acheminée sur le réseau de distribution aux utilisateurs finaux. Avant d'entrer chez l'utilisateur final, la moyenne tension est convertie en basse tension. Ce processus est représenté sur la figure 21. Ce flux de base de l'énergie électrique à la grille d'alimentation est resté inchangé pendant un peu plus d'un siècle [60]. Cependant, chaque sous-système de puissance électrique a évolué au fil du temps avec un rythme différent d'intégration de technologies et d'automatisation. Le réseau électrique

s'est ainsi transformé d'un ensemble de centrales isolées en des réseaux inter-connectés. Les réseaux de transport électriques sont inter-connectés aux niveaux régional, national et international pour offrir des itinéraires redondants de re-change pour le flux électrique en cas de déséquilibre entre l'offre et la demande, ou de défaillance des usines de production ou de l'équipement de transmission.

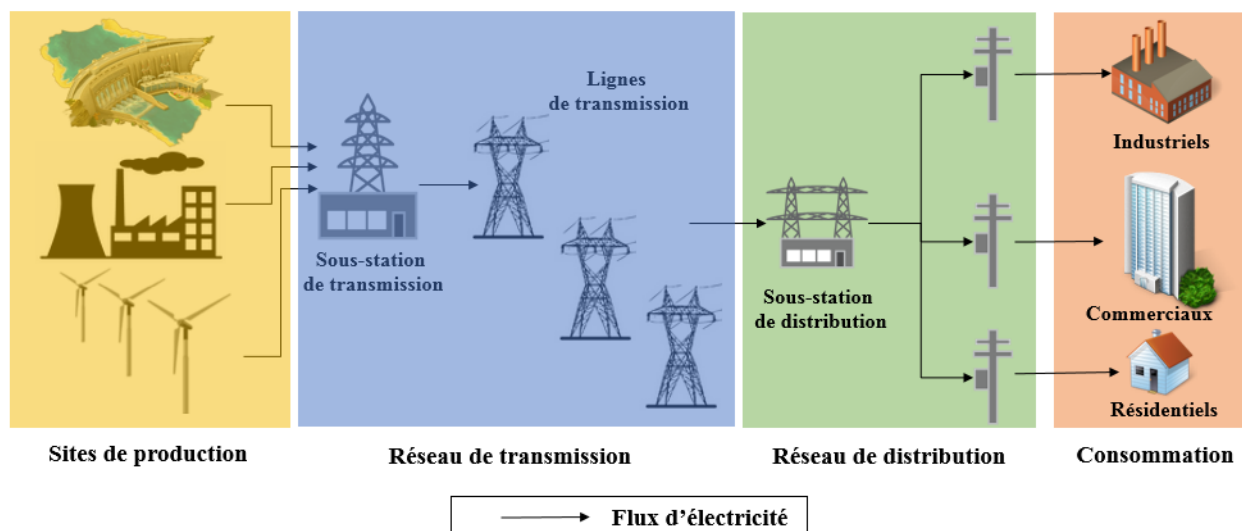


FIGURE 21 – Réseau d'électricité conventionnel

La répartition de l'électricité est gérée de manière centralisée par un centre de contrôle qui a la responsabilité du contrôle de plusieurs régions d'un emplacement central. Le centre de contrôle utilise un système de contrôle et de surveillance informatisé. Ce système est appelé système de contrôle et d'acquisition de données ou encore *Supervisory Control and Data Acquisition System* (SCADA). Le système SCADA, contient divers dispositifs électronique de contrôle et de surveillance ainsi que des équipements d'automatisation pour mesurer, surveiller et contrôler les composants du réseau électrique. Initialement, les systèmes SCADA, sont apparus après la grande panne d'électricité en 1965 [61] et se sont ensuite transformés en des Systèmes de gestion d'énergie (*Energy Management Systems* (EMSs)) dans les centres de contrôle [62].

Des unités terminales distantes (*Remote Terminal Units* (RTUs)) sont déployés dans les stations de transmission et de distribution pour recueillir des données en temps réel, avec une faible granularité temporelle relative (de 2 à 10 échantillons/s). Les systèmes de gestion d'énergie utilisent le contrôle automatique de la production (*Automatic Generation Control* (AGC)) pour l'estimation de l'état, les flux de puissance optimale, etc. Ainsi, les sections de la génération et de la transmission de courant dans le réseau électrique sont assez "intelligentes", bien

qu'il n'y ait pas beaucoup d'automatisation dans les centres de contrôle et donc une intervention humaine est souvent nécessaire.

Après les années 1990, certaines capacités de suivi en temps réel des installations de distribution et des clients ont été intégrées au système [61]. L'automatisation décentralisée, *Advanced Meter Reading* (AMR) et *Advanced Metering Infrastructure* (AMI) sont quelques exemples de ces efforts. Cependant, ceux-ci ont été déployés au niveau local dans des projets pilotes et donc leur utilisation n'est pas très répandue sur le réseau électrique à ce jour. Par conséquent, l'avancement actuel du réseau électrique est jugé insuffisant et trop localisé pour pouvoir adresser les nombreuses questions critiques quant aux besoins futurs des réseaux électriques. Le fonctionnement du réseau d'alimentation en courant est inefficace. L'absence de moyens effectifs pour l'accumulation d'énergie électrique impose un paradigme de fonctionnement à flux tendu pour faire face à la demande.

Cependant, la fluctuation de la demande met à rude épreuve l'infrastructure vieillissante et désuète du réseau électrique pendant les heures de pic de demande et donc pose de sérieuses questions de fiabilité, disponibilité et qualité de l'alimentation. Avec l'augmentation de la consommation d'électricité suite à la multiplication des appareils électriques et l'apparition de nouveaux usages de consommation tels que les véhicules électriques, les réseaux d'électricité conventionnels doivent être capables de fournir suffisamment d'énergie pour couvrir les nouveaux besoins. L'augmentation de la production d'énergie dans les centrales de production n'est sans doute pas la meilleure solution pour répondre à cette augmentation de demande à cause du coût extrêmement élevé sans parler des préoccupations environnementales ainsi que des pertes d'électricité hors heures de pointe.

De l'autre côté, le développement de la production d'électricité à partir des sources des énergies renouvelables (photovoltaïque, éolien) permet d'augmenter la production d'énergie tout en réduisant la dépendance aux énergies fossiles et diminuant ainsi les émissions de CO₂. Néanmoins, l'injection des énergies renouvelables dans le réseau d'électricité conventionnel qui n'a pas été conçu pour cela, à laquelle s'ajoute leur nature intermittente et peu prévisible (la variation horaire liée au passage du jour à la nuit, les conditions météorologiques, etc) pourrait créer des instabilités (sur-tensions ou les sous-tensions) voire des pannes. Ce qui complique de plus en plus l'équilibrage du réseau.

Pour s'adapter à ces évolutions, les réseaux électriques doivent innover en favorisant l'intégration des énergies renouvelables et la circulation de l'information sur l'ensemble du réseau. Par conséquent, la mutation vers des réseaux électriques intelligents, appelés aussi SGs devient nécessaire.

Réseau d'électricité intelligent : le smart grid

Le SG peut être considéré comme la modernisation du réseau d'électricité grâce à l'intégration intensive des nouvelles technologies de la communication et de l'information. Le but principal de cette évolution est la conception d'un réseau d'électricité plus fiable, efficace, sécurisé et durable afin de réaliser les objectifs suivants :

- l'amélioration de l'efficacité énergétique du système (minimiser les pertes, éliminer les interruptions, maximiser la productivité, ...),
- l'intégration plus efficace des ressources d'énergie renouvelable,
- le contrôle, le monitoring et le pilotage en temps réel de l'ensemble du réseau,
- l'intégration plus efficace et optimisée des nouveaux usages électriques, notamment des véhicules électriques,
- la satisfaction de la demande croissante d'énergie,
- l'optimisation de la demande,
- l'amélioration de l'empreinte carbone.

Le concept du SG apporte, principalement, deux évolutions majeures dans la gestion de l'électricité. La première concerne l'architecture du réseau électrique. En effet, pour s'adapter aux productions d'énergies intermittentes et décentralisées, comme les énergies renouvelables, et aux nouveaux usages, comme la recharge des véhicules électriques, qui menacent de déstabiliser le réseau et de provoquer des coupures et des surtensions, le réseau évolue d'un système centralisé avec un flux d'électricité coulant dans un sens unique vers un système supportant le flux bidirectionnel de l'énergie mais aussi de l'information sur l'ensemble du réseau. Grâce à l'utilisation de capteurs et d'équipements numériques de protection, de mesure et de communication, le réseau devient entièrement pilotable facilitant ainsi l'intégration des équipements de production et de stockage d'électricité distribués tels que les installations d'énergies renouvelables, les pompage-turbinage ou encore les installations de gaz à cycle combiné, aussi bien que des technologies (produits et services) et outils innovants tels que les véhicules électriques.

La deuxième évolution concerne les consommateurs qui deviennent des acteurs du système électrique pour participer dans la diminution de la consommation énergétique et la maîtrise des pointes de consommations génératrices d'investissements lourds et d'émissions de gaz à effet de serre, d'où le terme *consom'acteur*. Un *consom'acteur* est capable de réguler lui-même sa consommation (son éclairage, son chauffage, son équipement informatique, technologique et électroménager) et même de contribuer à l'effacement des pics de consommations grâce

aux offres de délestage proposées par les fournisseurs de services, tout en étant acteur de sa modification graduelle de comportement. Cela passe par une communication renforcée entre le réseau et le consommateur à travers les compteurs intelligents. De plus, le smart grid permet aux consommateurs de devenir des producteurs décentralisés de petites capacités (ex : les éoliennes ou les panneaux photovoltaïques appartenant à des particuliers). Le réseau électrique intelligent offre à tous les consommateurs la possibilité d'obtenir des informations précises sur leurs usages électriques. Cela leur permet de mieux connaître et piloter leur propre consommation, leur éventuelle auto-production et d'améliorer leur efficacité énergétique, en liaison avec le réseau et ses opérateurs.

Au moyen de ces évolutions, le SG contribue à améliorer la sécurité d'approvisionnement et à améliorer l'efficacité de l'ensemble du système en garantissant un fonctionnement optimal des éléments du réseaux et répondant aux besoins des parties prenantes.

Selon l'institut national de normalisation et de technologie (National Institute of Standards and Technology (NIST)), le SG peut être modélisé en sept principaux domaines de haut niveau : sites de génération d'électricité, transport, distribution, clients, centre de contrôle, fournisseurs de services et marché [63]. Nous illustrons ces domaines ainsi que les flux de communications et d'électricité circulant entre eux dans la figure 22. A l'instar du réseau d'électricité conventionnel, le smart grid maintient les 4 principaux domaines de la chaîne électrique : sites de génération d'électricité, transport, distribution et clients.

Architecture du Smart Grid

La mise en place d'un réseau d'électricité intelligent donne lieu à l'introduction de nouveaux acteurs et éléments dans le système qui devient de plus en plus complexe. Dans le but de faciliter la progression des travaux de normalisation, le groupe de travail européen *CEN-CENELEC-ETSI Smart Grid Coordination Group* (groupe de coordination du comité européen de normalisation (CEN), comité européen de normalisation électrotechnique (CENELEC) et institut européen des normes de télécommunications (ETSI) sur le Smart Grid) a publié un modèle référence pour l'architecture Smart Grid désigné par *smart grid architectural model* (SGAM) [3]. Le modèle SGAM propose une structure multi-couche qui cartographie les activités liées aux systèmes intelligents selon les domaines (production, transport, distribution...), les zones (marché, entreprise, opération...) et les couches d'intervention (composant, communication, information, fonction, marché).

Comme le décrit le SGAM, le smart grid est un système complexe de sous-systèmes. La gestion du système électrique est formée de deux niveaux la gestion

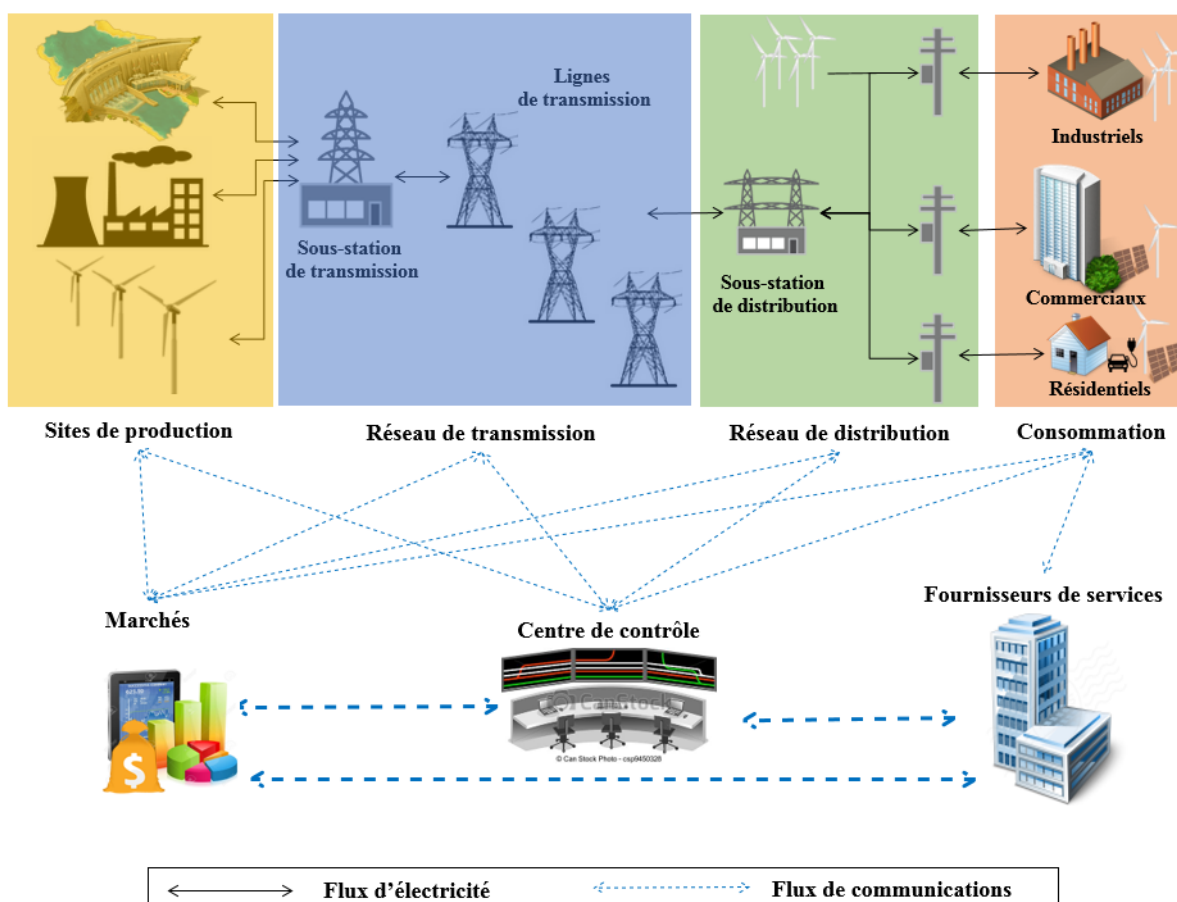


FIGURE 22 – Smart Grid

du processus électrique et la gestion de l'information. Le SGAM, présenté dans la figure 23, distingue les domaines physiques de la chaîne de conversion d'énergie électrique des zones hiérarchiques (ou niveaux) pour la gestion du processus électrique. Afin de faciliter le développement de différentes solutions de réseaux intelligents, le concept d'interopérabilité a été introduit, et normalisé en utilisant le cadre SGAM. Nous entendons par interopérabilité la capacité des différents systèmes d'interfonctionner, d'échanger et d'utiliser l'information pour accomplir / exécuter des fonctions requises [3]. Le SGAM se compose de 5 couches représentant :

- La couche **composants** contient les composants physiques du processus de conversion d'énergie,
- La couche **communication** définit des protocoles et des mécanismes nécessaires pour l'échange d'informations entre les différentes composantes du système,

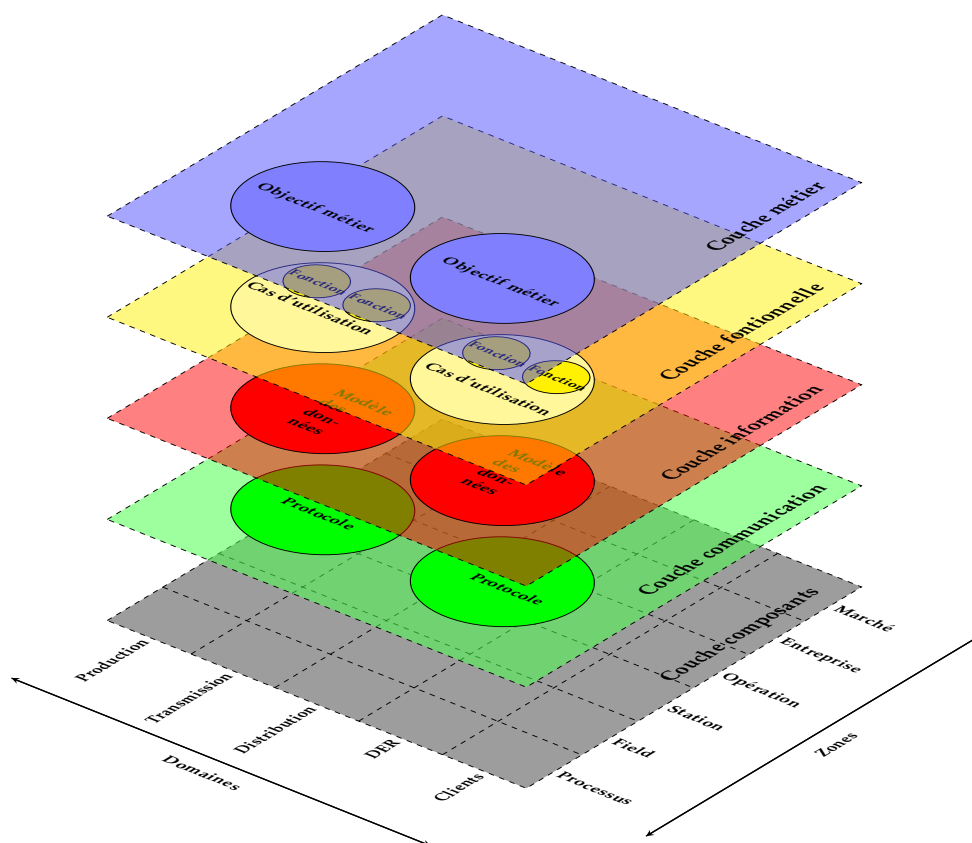


FIGURE 23 – SGAM [3]

- La couche **information** représente les modèles de données nécessaires au traitement des informations afin de remplir les fonctions définies dans la couche suivante,
- La couche **fonctionnelle** organise le SG en blocs fonctionnels de manière à garantir son évolutivité tout en répondant aux besoins métier de l'entreprise,
- La couche **métier** définit les objectifs métier de l'entreprise, les processus, ainsi que les acteurs.

Dans nos travaux, nous nous intéressons à la couche de communication. Nous présentons dans la section suivante, les différents composants de cette couche : les réseaux de communication du smart grid.

Réseaux de communication du Smart Grid

Le réseau électrique actuel utilise un réseau de communication pour soutenir ses opérations. Cette communication réseau utilise une variété de technologies de communication, allant du câblé, tels que les câbles en cuivre, fibre optique, communication sur les lignes du réseau électrique, aux réseaux sans fil. L'élément crucial des communications se trouve entre les centres de contrôle et les postes individuels. Cependant, le réseau de communication existant est insuffisant, inflexible, et coûteux. Cette insuffisance découle de plusieurs facteurs : d'abord, les réseaux de communication existants ne couvrent que les segments de la production et le transport. Ils ne couvrent pas les activités de distribution où des changements importants devraient se produire tels que l'intégration des énergies renouvelables et des nouveaux services et applications. Deuxièmement, la capacité et la vitesse du réseau de communication installé sont insuffisantes pour accueillir la croissance future de la capacité et les exigences de vitesse d'applications de SG. Troisièmement, les modifications du réseau existant sont difficiles et lourdes à réaliser. L'arrivée de nouveaux acteurs peut exiger l'installation de réseaux de communications supplémentaires ou modifier les applications existantes pour répondre aux besoins de ces participants. Ceci n'est pas seulement coûteux en termes de conception, matériel, et de programmation, mais aussi il peut augmenter les délais de livraison de données. Par conséquent, un nouveau réseau de communication étendu est nécessaire pour soutenir une large gamme d'applications, ainsi que pour répondre à la demande future. En conséquence, un réseau de communication intégré est ajouté au réseau électrique pour le contrôle et pour permettre un fonctionnement fiable et sûr d'un réseau électrique bi-directionnel. Ce réseau de communication intégré couvre tout le réseau électrique, de la production à la distribution comme le montre la figure 24.

Le SG ne va pas utiliser un seul type de réseau de communication. Il n'y a pas une solution unique ou un réseau représentatif pour le SG puisque chaque réseau possède différentes topographies, différents régimes de réglementation, et différents réseaux de communications existants. Les SGs devraient être des réseaux multi-niveaux supportés par un maillage hybride de différentes technologies de communication pour fournir un accès efficace et fiable aux différents composants du réseau dans des environnements divers. Principalement, il y a trois composantes de ce réseau multi-niveau qui peuvent déployer une variété de réseaux de communication, y compris avec ou sans fil, avec ou sans licence, privé ou commercial, fixe ou mobile, à bande étroite ou à large bande. Les réseaux domestiques (HAN, Home Area Network) diffèrent des réseaux de voisinage (NAN, Neighborhood Area Network) et des réseaux étendus (WAN, Wide Area Network).

Dans cette section, nous décrivons le réseau sous-jacent de communication dans

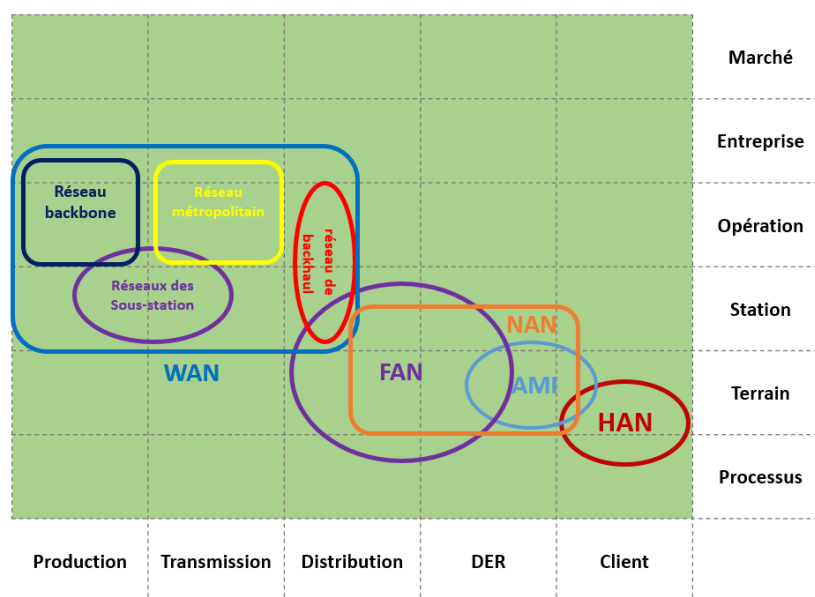


FIGURE 24 – Mapping des SGCNs sur la couche communication du SGAM

les détails et ensuite nous identifions les problèmes de conception de routage dans ce réseau de communication.

Les réseaux domestiques (Home Area Networks (HAN))

Le *home area network* (HAN) est situé dans le domaine "client" du SGAM permet l'accès aux appareils à domicile. Comme montré dans la figure 25, chaque dispositif d'accueil enverra ses lectures de puissance sur ce réseau au compteur à domicile ou passerelle en dehors de la maison pour les applications de AMI. Le HAN permet également aux réseaux domotiques des applications de surveillance et des applications de contrôle pour le confort de l'utilisateur, de gestion efficace de la maison [64] et l'application demand response (DR) [65].

Les réseaux domotiques sont constitués de différents capteurs et actionneurs pour effectuer une variété d'applications, comme le contrôle de la lumière, la télécommande, l'énergie intelligente, les soins à distance, et la sécurité. Par exemple, l'application de contrôle de la lumière permet de contrôler les lumières à partir de n'importe quel commutateur ou de les activer par télécommande ou la mise sous/hors tension automatique sur la base des informations de capteurs ou demande DR de l'entreprise de distribution électrique.

Le réseau BAN, pour Building or Business Area Network, est utilisé pour dé-

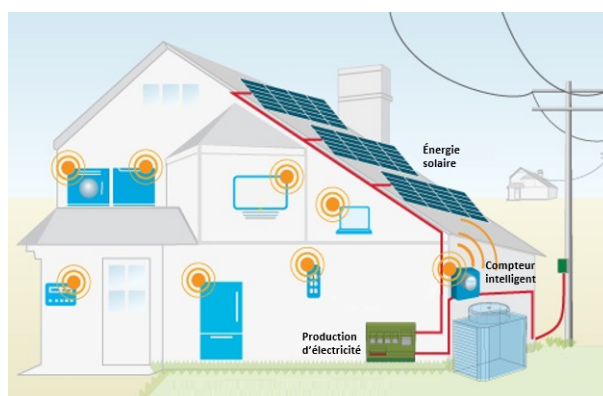


FIGURE 25 – HAN [4]

signer des réseaux similaires lorsqu'ils sont implémentés dans des entreprises. Le réseau Industrial Area Network (IAN) est utilisé pour des réseaux similaires implémentés dans un milieu industriel. Les communications sans fil sont préférées dans les HAN / BAN / IAN aux réseaux filaires car ils permettent une plus grande flexibilité pour l'ajout et l'enlèvement de dispositifs et réduisent les coûts d'installation. En outre, le volume des réseaux domotiques à forte densité de nœuds peut rendre les approches filaires peu pratiques. Toutefois, la solution sans fil est exploitée dans un environnement à trajets multiples en raison de la présence de surfaces réfléchissantes dans la maison et soumise à des interférences avec des appareils électroniques comme les téléphones sans fil, les fours à micro-ondes, etc.

Les appareils peuvent être classés en quatre groupes en fonction de leurs besoins de communication. Les appareils de petites charges forment le premier groupe, comme les ampoules de lumière, les chargeurs de téléphone et ordinateurs portables. Gérer ces appareils n'aura pas une réduction significative sur le profil de la charge totale donc ces appareils auront besoin de flux minimal de communications aux centres de contrôle. Le deuxième groupe est constitué des gros appareils incontrôlables, comme un poêle. Un poêle est utilisé chaque fois que nécessaire, et donc il ne peut pas être contrôlé. Ce groupe exige aussi un minimum de communications au centre de contrôle. Le troisième groupe est composé de grands appareils contrôlables, tels que les climatiseurs, lave-linge et sèche-linge. Les centres de contrôle exigent des informations détaillées provenant de ce groupe, telles que la charge attendue, la durée d'utilisation, et la durée de disponibilité de l'appareil. Contrairement aux précédentes catégories, ces appareils nécessitent un accusé de réception à partir du centre de commande pour commencer l'opération. Par conséquent, ce groupe exige des communica-

tions importantes entre le centre de contrôle et les appareils. Le dernier groupe est composé des véhicules électriques (VEs). Les VEs exigent une charge très conséquente et donc la gestion de leur temps de charge à l'avance est très conséquente. Ce groupe exige également de nombreuses communications entre les véhicules électriques et le centre de contrôle.

La couverture typique pour ce type de réseau est prévue pour être de l'ordre de plusieurs centaines de mètres carrés. Le débit de données devrait être faible, typiquement de l'ordre de 1 à 10 Kbps. Les solutions de communications possibles pour HAN [66] comprennent les normes sans fil, comme IEEE 802.15.4 et IEEE 802.11, et piles de communication propriétaires tels que Z-Wave, ou courant porteur en ligne (CPL) tels que HomePlug.

Les réseaux de voisinage (Neighborhood Area Network (NAN))

Le segment de distribution, au niveau duquel sont connectés les utilisateurs finaux, est celui sur lequel le développement du réseau électrique intelligent a le plus d'incidence. Il s'agit d'incorporer des générateurs distribués de petite ou de moyenne taille et de gérer des courants électriques bidirectionnels dans un réseau conçu pour un courant unidirectionnel, en plus des autres nouvelles installations telles que les VEs, les CIs, *etc.* Le réseau NAN présente le réseau de communication déployé au niveau distribution. Ce nouveau canal de communication bidirectionnel avec les consommateurs sert aux collectes de données et au transport d'informations entre les entités du réseau de distribution, et permet de réagir en temps réel aux conditions du réseau en pratiquant la tarification dynamique et le délestage électrique. Il peut notamment être utilisé pour informer les fournisseurs d'électricité de la consommation de certaines installations et de l'emplacement de la nouvelle source d'électricité résultant du branchement de véhicules électriques.

Le NAN connecte les compteurs intelligents à des points d'accès locaux appelés points d'agrégation des données (*data aggregation points (DAPs)*) pour fournir une plateforme de communication bidirectionnelle entre les opérateurs et les clients pour applications AMI. Cela peut être un réseau de compteurs intelligents, sous forme d'un maillage isolé, ou une partie d'un réseau maillé, qui se compose de compteurs intelligents et de passerelles pour le transfert des données.

La version de ce réseau qui est déployée pour recueillir les données des lignes électriques, main-d'œuvre mobile, tours, *etc.* et pour surveiller le réseau électrique est appelée *field area network (FAN)*.

La couverture d'un NAN est d'environ 1-10 km^2 . Le débit de données est supérieur à celui des HANs, environ autour 10-1000 Kbps. Plusieurs technologies de communication ont été proposées pour les NANs dans la littérature. Du côté

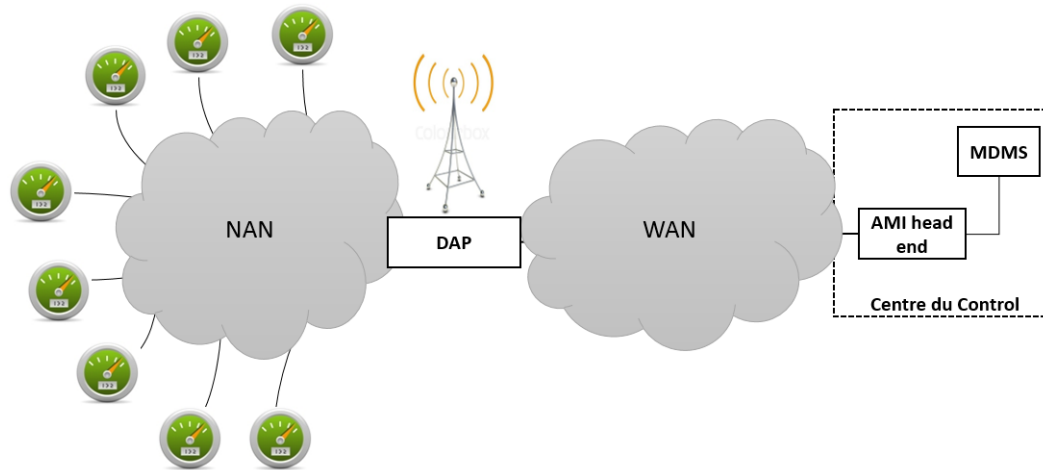


FIGURE 26 – AMI

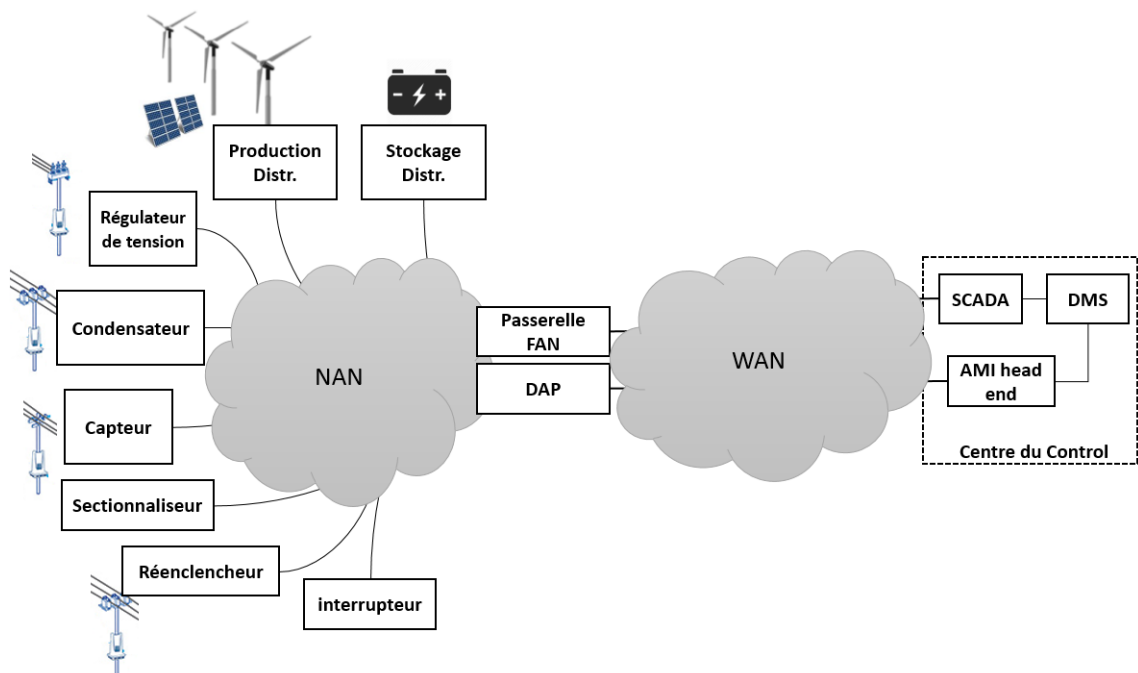


FIGURE 27 – FAN

sans fil, les réseaux sans fil maillés (RF Mesh) et les normes cellulaires telles que 3G, 4G et LTE, sont des candidats probables en cours d'étude pour une utilisation au niveau NAN [65]. Cependant, les réseaux cellulaires et les réseaux

sans fil maillés sont les candidats les plus pertinents, car ils bénéficient d'une large bande passante et sont capables de supporter diverses exigences de qualité de service, ce qui les rend appropriés pour la plupart des applications SG [67]. Surtout, les réseaux maillés sans fil sont capables d'auto-organisation, auto-configuration, auto-guérison, et peuvent transmettre à l'aide de communication multi-sauts [66]. Du côté filaire, l'Ethernet, le CPL ou la norme DOCSIS (*Data Over Cable Service Interface Specification*) sont des solutions possibles pour les communications du NAN [65]. Le CPL est un candidat solide parmi les technologies filaires pour les communications NAN. En effet, un atout majeur du CPL tient au fait que, comparé à d'autres architectures filaires ou sans fil, il s'agit d'une technologie économique puisque les câbles d'alimentation existent déjà, même dans les zones rurales, ce qui réduit considérablement le coût du déploiement du réseau de communication. En outre, les câbles d'alimentation sont la propriété de la compagnie d'électricité, ce qui offre un degré d'indépendance par rapport à d'autres réseaux. Cependant, le CPL présente plusieurs limites. La connectivité du réseau dépendra de l'état du réseau et aussi des signaux de communication qui sont transmis par CPL qui sont atteints par de fortes atténuations [67].

Le réseau étendu : Wide Area Network (WAN)

Le réseau étendu (*wide area network* (WAN)) est chargé de relier les centres de contrôle aux autres réseaux distribués tout au long du système d'alimentation. Il inter-connecte les réseaux *core/backbone networks*, *regional/metropolitan networks* (MAN), et *backhaul network*. Le réseau *backhaul* relie les réseaux NAN et achemine les données provenant des NANs vers les réseaux privés des fournisseurs de service. Ainsi, le réseau WAN permet d'assurer les communications à longue distance entre les différents points d'agrégation de données des centrales de production d'énergie, stations de ressources énergétiques distribuées, sous-stations, les réseaux de transmission et de distribution, les centres de contrôle, etc... De plus, le WAN de la compagnie d'électricité permet de fournir une infrastructure de communication bidirectionnelle pour assurer les communications de sous-station, l'automatisation de la distribution, la surveillance de la qualité de l'énergie, etc. Le WAN peut couvrir une très grande région, à savoir, des milliers de kilomètres carrés et pourrait regrouper un grand nombre de périphériques pris en charge et exigent donc des centaines de méga-bits par seconde (Mbps) de transmission de données [68][69].

Les mêmes technologies et normes de communications sans fil proposées pour les NANs (WiMAX, 3GPP, RF Mesh) ont été également proposées pour les WANs au niveau *Backhaul*. Cependant, les réseaux cellulaires, WiMAX, et les communications filaires sont considérés comme les meilleures technologies candidates

pour WAN [66][67]. Pour les options filaires, DSL ou les réseaux optiques passifs (PON) peuvent être utilisés[66]. Metro Ethernet pour le réseau de base peut être mis en œuvre avec des technologies filaires telles que Internet Protocol/Multi Protocol Label switching (IP/MPLS) et de fibres (SONET) [65]. Néanmoins, la fibre et la communication à micro-ondes sont préférées pour les besoins de bande passante élevée et une communication fiable, car à ce niveau de grandes quantités de données critiques sont réunies pour la transmission au back office [66][70].

Pour plus de détails sur les technologies et standards de communication des réseaux de télécommunication du Smart grid se référer à [68][69].

Les nouvelles applications introduites par Smart Grid

En incorporant des éléments de génie énergétique innovants, des technologies évoluées de détection et de surveillance, et des capacités d'information et de communication dans le réseau d'électricité, plusieurs applications et services seront développés et intégrés par le smart grid dans le but d'améliorer ses performances et de soutenir les autres processus métier de l'opérateur, en particulier les services aux clients. Dans cette section, nous étudions les différentes applications attendues du smart grid présentées dans la littérature [70][71]. Nous présentons ces services dans six catégories en se basant sur la classification proposée par U.S. department of energy (DOE) dans [72] qui est, elle-même, basée sur un travail précédent de *the Federal Energy Regulatory Commission (FERC)* développé par NIST.

Les applications de l'infrastructure de comptage évolué

Le déploiement massif des compteurs évolués, appelée aussi compteurs intelligents (CIs), est l'un des éléments clés du Smart Grid. L'infrastructure composée de ces compteurs évolués associée à un réseau de télécommunication bidirectionnel, appelée AMI, offre une plateforme de détection et surveillance et des capacités d'information et de communication. En effet, ces compteurs évolués et intelligents sont capables de mesurer plusieurs types de flux électriques avec une haute précision et surtout, ils sont communicants. Ils permettent ainsi de contrôler et de piloter des flux bidirectionnels de courant et d'information, au niveau distribution.

En jouant le rôle d'intermédiaire entre les fournisseurs d'énergie et les consommateurs, l'AMI ouvre en effet la porte à des nombreuses applications innovantes, pour le distributeur, premier concerné, mais également aux consommateurs. Le comptage intelligent et évolué (Smart Metering) [73] présente l'ensemble

de services principaux permis par l'AMI. En fait, cette infrastructure offre un moyen assez fiable ainsi qu'économique pour la lecture des compteurs, ce qui permet aux fournisseurs de service de limiter le déplacement du personnel et éviter ainsi les erreurs de lecture des compteurs. Ceci permet également de suivre la consommation en temps réel et offre ainsi la possibilité d'un meilleur contrôle de la distribution d'énergie aux heures des pointes.

L'AMI contribue, aussi, à l'amélioration de la fiabilité, de la rapidité et de la fluidité des différents processus du marché, principalement la facturation. Au lieu d'utiliser des estimations sur des bases techniques, historiques ou saisonnières qui, souvent, entraînent l'imprécision des facturations, les systèmes de comptage évolués, en facilitant l'accès aux paramètres du comptage et le relevé des compteurs, permet l'émission de facturation mensuelle basée sur des données de consommation réelle. En plus, d'autres applications évoluées peuvent être développées telles que la facturation non-périodique, les processus de changement de fournisseur, de changement d'offre de fourniture, de mise en service, de résiliation, de changement de puissance souscrite ou de changement de formule tarifaire, *etc* en bénéficiant des données de comptage réelles et non contestables. Du côté des consommateurs, l'AMI contribue à améliorer la sensibilisation des consommateurs et de l'interactivité. En effet, elle fournit aux consommateurs un moyen de suivre leurs profils de consommations en temps réel, ainsi que leurs historiques, de comparer la consommation d'énergie dans les ménages similaires, des informations dynamiques sur les prix, et ont suggéré des approches pour réduire la charge aux heures des pointes par l'intermédiaire d'écrans à domicile [72]. Ainsi, par l'intermédiaire de cette plateforme, les consommateurs ont désormais les moyens pour réduire leur facture d'électricité et jouer un rôle plus actif dans le débat énergétique – contribuer à lutter contre le changement climatique et participer à la réduction de la consommation d'énergie. Ils sont donc des *consom'acteurs*.

La gestion active de la demande

La gestion de la demande (*demand-side management* (DSM)), est un ensemble de services qui visent à assurer la stabilité et l'équilibre du réseau tout en limitant le recours au démarrage de nouvelles productions d'électricité très coûteuses et très polluantes. Ces services se basent principalement sur le rôle des *consom'acteurs*, en particulier dans le secteur industriel, pour diminuer globalement la consommation d'électricité en changeant ou adaptant leurs comportements.

Le DSM se compose d'un ensemble de programmes et activités visant à permettre et à encourager le consommateur à modifier ses habitudes de consommation d'électricité afin de réduire sa demande pendant les périodes de pointe. Ces programmes consistent à faire de la demande une variable d'ajustement en

agissant sur la demande d'électricité plutôt que sur l'offre. DSM comprend des programmes d'équilibrage offre/demande (DR) et des programmes d'efficacité et de conservation énergétique [74]. Les programmes d'équilibrage offre/demande, appelés également décalage de charge, consistent à transférer la charge des clients pendant les périodes de forte demande pour les périodes hors pointe par des effacements de consommation, c'est-à-dire la coupure momentanée, autorisée et ciblée (usages électriques reportables ou annulables sans impact sur le confort) de l'alimentation électrique de certains équipements. Les programmes de conservation énergétique encouragent les clients à limiter leur consommation d'énergie en échange d'économiser de l'argent, par exemple, de monter le thermostat de quelques degrés en été pour réduire la climatisation, tandis que les programmes d'efficacité énergétique permettent aux clients d'utiliser moins d'énergie tout en recevant le même niveau de fin de service et de confort, comme le remplacement des anciens appareils électriques par d'autres plus évolués avec une meilleure efficacité énergétique.

La gestion distribuée du réseau électrique

La gestion distribuée du réseau électrique est composée de diverses technologies d'automatisation du SG pour la collecte en temps réel d'informations et le contrôle à distance des appareils dans la grille. Quelques exemples sont l'automatisation de la distribution, l'automatisation des postes, gestion de flotte par localisation automatique des véhicules (AVL), et vidéo surveillance. L'automatisation de la distribution (*distribution automation* (DA)) est localisée dans la sous-station de distribution et implémente une décision automatisée pour rendre plus efficace la détection de défaut, l'isolement, et la restauration. L'automatisation des postes est atteinte à travers SCADA pour contrôler et surveiller la grille. L'AVL est utilisée pour suivre et diriger la main-d'œuvre mobile à l'emplacement qui doit être réparé. La surveillance vidéo est utilisée pour surveiller les actifs de SG critiques.

Transport électrique

Le transport électrique, via des véhicules électriques (PEV : Plug-in electric vehicles) ou des véhicules électriques hybrides (PHEV : Plug-in hybrid electric vehicles), devrait améliorer ou même remplacer le transport traditionnel qui utilise des combustibles fossiles. Au lieu d'utiliser un carburant fossile, un VE utilise un ou plusieurs moteurs électriques qui sont alimentés par un accumulateur électrique rechargeable. Pour recharger le stockage électrique d'un véhicule électrique, le stockage électrique est relié au SG et le flux d'énergie électrique s'établit du SG vers le stockage électrique du VE. Ceci est connu sous le nom

"Grille à véhicule" (G2V) et peut se produire à la maison ou dans des installations de recharge publiques. Il est envisagé que la plus grande partie du processus de charge aura lieu dans les installations de recharge publiques plutôt que dans les maisons et presque en même temps (par exemple, le matin après que les propriétaires arrivent à leurs bureaux). Par conséquent, la charge totale de G2V à un moment donné peut créer une nouvelle demande de puissance de pointe en plus de la demande de puissance crête existante. D'autre part, le VE peut également présenter une nouvelle fonctionnalité comme un stockage d'énergie qui peut être utilisé pour réduire la demande de pointe en cas de besoin. ce flux se fait du véhicule au grid (V2G). Dans le V2G, un véhicule électrique est connecté au SG et lui fournit de l'énergie électrique qu'il aurait emmagasiné auparavant. Ainsi, un flux bidirectionnel du courant électrique se produit entre les véhicules électriques et le SG. Afin de rendre un tel échange possible, une communication intensive de données entre les véhicules électriques et la SG est nécessaire (par exemple, pour facturer l'utilisateur et pour l'évaluation de la demande de pointe). Étant donné que ces communications se produisent lorsque les véhicules électriques sont garés et connectés à la SG, le point de connexion peut être le HAN ou le NAN.

Production et Stockage distribués de l'électricité (distributed energy resources and storages (DERs))

Dans le smart grid, les fournisseurs d'électricité ne seront plus limités aux grandes stations de production. En effet il y aura intégration de diverses ressources d'énergie distribuée (*distributed energy resource* (DER)). Ces ressources se trouvent à la transmission, distribution, ou même aux installations des utilisateurs finaux. Ces DERs seront intégrées dans les systèmes d'alimentation et complèteront la génération de gros centralisée. En outre, la présence des DERs devrait introduire de nombreuses fonctionnalités. Par exemple, de nouveaux besoins de stockage de l'énergie s'imposent afin d'emmagasiner le surplus d'électricité à un moment donné pour sa distribution par la suite ou pour l'utiliser pour compenser les fluctuations de production d'énergie à partir de sources renouvelables telles que l'éolien et le solaire. De plus, à la fois les ressources de stockage de l'énergie et DER installés chez les utilisateurs finaux permettent une participation active des utilisateurs dans le choix de la source d'alimentation. L'excès d'électricité peut être utilisé en tant que backup au moment de perturbations de l'alimentation ou pour soutenir les changements de réponse à la demande. Il peut aussi être vendu sur le marché de l'électricité. Pour coordonner ces activités des DERs, une infrastructure de communication efficace est nécessaire au niveau des NAN et, très probablement, au niveau HAN.

Monitoring à grande échelle des conditions du réseau

Le monitoring à grande échelle des conditions du réseau (wide area situational awareness (WASA)) utilise diverses technologies qui prennent en charge le suivi en temps réel (ou presque) du réseau d'électricité à travers de grandes zones géographiques. Une quantité massive d'informations à fréquence très élevée, de l'ordre de la milliseconde, sur l'état actuel du réseau électrique sont recueillies auprès des réseaux de transmission et les sous-stations électriques. Les informations recueillies sont utilisées pour optimiser la performance des composants de la grille, ainsi que pour fournir une prévention plus opportune lorsque des problèmes sont détectés pour éviter la perturbation du réseau d'alimentation. WASA peut être divisée en trois parties sur la base de l'utilisation de l'information : le *Wide Area Monitoring Systems* (WAMS), le système de contrôle régional (*Wide Area Control System* (WACS)), et le système de protection régional (*Wide Area Protection System* (WAPS)). Les WACS et WAPS nécessitent une bande passante élevée pour répondre aux exigences de synchronisation. Les informations pertinentes voyagent à travers les NAN et les WAN.

Conclusion

Dans cette partie, nous nous sommes focalisés sur la communication au niveau du réseau de distribution du smart grid, en particulier sur le réseau NAN. En effet, le Smart Grid révolutionne sans doute l'ensemble du réseau d'électricité, cependant le réseau de distribution, sur lequel la visibilité est très faible actuellement, est le segment du réseau qui subira le plus de changements. La plupart des nouveaux services et applications seront développés à ce niveau. En intégrant intensément les outils du contrôle, de mesure et de communication tout au long du segment, la quantité de données circulant sur l'infrastructure de communication explose. La nature de ces données dépendra de l'application qui l'utilise, allant de critique comme les alertes de dysfonctionnement à la simple commande ou données comme les mesures périodiques ou encore données de mise à jour des firmwares. Le routage des données entre les différentes parties du réseaux est l'une des majeures contraintes pour la couche communication du smart grid, en particulier pour les NANs. En effet, les protocoles de routages de données doivent respecter la nature des données afin de satisfaire les exigences des applications qui les utilisent tout en tenant compte des particularités du réseau NAN. Dans le chapitre suivant, nous étudions les exigences de la communication au niveau des réseaux NANs.

*

Évaluation des performances de GRACO dans le contexte des SG NANs

Dans ce chapitre, nous analysons les exigences de la communication au sein des NANs, en particulier nous nous concentrons sur les exigences qui doivent être prises en compte au cours du processus du routage des données. Par la suite, nous étudions l'état de l'art des protocoles de routage pour les réseaux NAN, en particulier les protocoles RPL et GPSR comme étant les candidats les plus pertinents, dans le but de mettre l'accent sur leurs limites. Nous étudions, ensuite, l'utilisation de GRACO pour le routage des données sur les réseaux NAN. Enfin, nous évaluons les performances de GRACO dans un environnement NAN.

Exigences de la communication pour les NANs

Pour concevoir une nouvelle solution de communication en mesure de soutenir le déploiement du NAN, il est primordial de comprendre ses besoins. Dans cette section, nous identifions les besoins de la communication qui doivent être pris en compte afin de réaliser un déploiement fiable, efficace et robuste des NANs. Nous décrivons ces exigences à travers l'étude des applications et des services qui doivent être supportés par les NANs. Nous présentons également les principaux défis qui doivent être relevés afin de faciliter le déploiement des NANs.

Schémas de communication

Un NAN doit soutenir un large éventail de nouvelles applications et services qui aideront les opérateurs à fournir de l'énergie plus efficacement et qui permettront aux consommateurs de mieux gérer leur consommation d'énergie [75]. Plusieurs applications supportées par le NAN nécessitent une communication

point-à-multipoint (P2MP) où un dispositif de contrôle central a besoin de diffuser des signaux ou des données à un ensemble ou à toutes les entités du NAN. La tarification dynamique est l'une des applications nécessitant un schéma de communication P2MP. En effet, les signaux de tarification sont diffusés aux consommateurs à travers des dispositifs du NAN y compris les CIs, les appareils intelligents, les VEs et les dispositifs de contrôle de charge. En utilisant les programmes de tarification dynamique, telles que *Time of Use* (ToU), le *Real Time Pricing* (RTP) et le *Critical Time Pricing* (RPC), les fournisseurs de service encouragent les consommateurs à réduire leur consommation, en particulier pendant les périodes de pointe. En réalité, les programmes de tarification dynamique offrent une situation gagnant-gagnant permettant aux opérateurs de réduire le coût de la production d'énergie et de satisfaire l'équilibre offre/demande, et aux consommateurs de réduire leurs factures d'électricité.

D'autres applications du NAN exigent une communication multipoint-à-point (MP2P). Dans de telles applications, les dispositifs du NAN ont besoin de communiquer des signaux de commande ou des mesures collectées/détectées à un dispositif de contrôle central. Le *Smart Metering* est l'une des applications exigeant un schéma de communication de type MP2P. Cette application regroupe plusieurs cas d'utilisation de lecture automatique des compteurs, comme la récolte des mesures de consommation en temps réel ou périodiques qui sont par la suite envoyées aux opérateurs d'électricité pour les utiliser dans diverses applications comme la facturation, ou encore l'envoi des données en réponse à une demande de service.

La modernisation du réseau d'électricité par l'intégration de nouveaux éléments matériels et logiciels dans le réseau d'électricité ouvre la voie aux solutions de contrôle et de pilotage distribuées permettant de faciliter les tâches de commandes et de monitoring. L'architecture distribuée du smart grid permet d'assurer la robustesse et la réactivité du contrôle en comparaison avec les stratégies de contrôle classiques. Afin d'assurer un tel contrôle, le réseau de communication doit supporter la communication point-à-point (P2P). Ceci diminuera significativement le stress de communication concentré sur le centre de contrôle à l'aide d'une communication P2P [61].

L'intégration des énergies renouvelables dans le réseau de distribution doit relever de nombreuses contraintes telles que la gestion de la production et l'injection de l'énergie dans le réseau face à leur nature imprévisible et intermittente. L'une des applications prometteuses du SG est le VPP qui permet de réunir les petites sources d'énergie ainsi que les systèmes disponibles de stockage d'énergie afin d'optimiser leur mise en réseau. La figure 28 modélise la structure générale d'un VPP, plusieurs sources d'énergies de différentes natures et réparties dans une vaste zone géographique peuvent rejoindre le VPP.

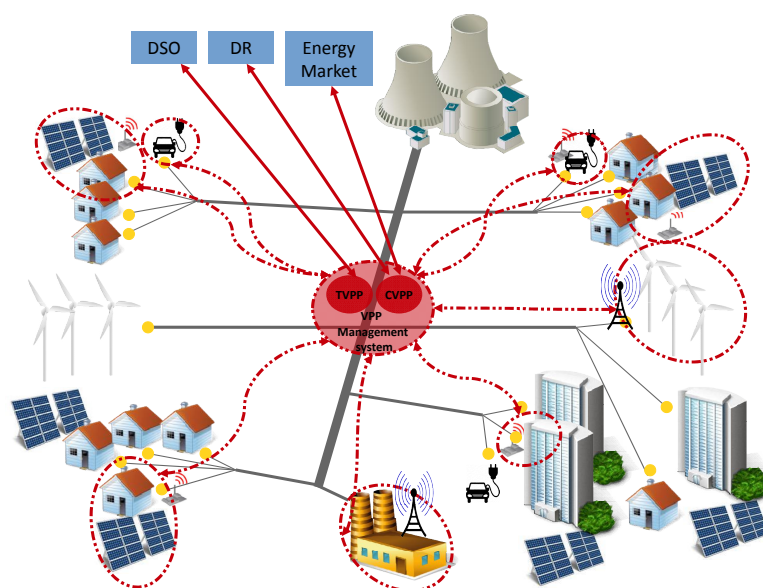


FIGURE 28 – Illustration d'un VPP. Les entités entourées de cercles rouges ont décidé de rejoindre le VPP.

Grâce aux stratégies de contrôle et pilotage intelligentes, le VPP permet de garantir un approvisionnement en électricité aussi fiable que les centrales électriques tout en proposant un prix de l'électricité plus bas et moins volatile. Ces stratégies peuvent être centralisées, hiérarchiques ou distribuées.

Dans le contrôle centralisé [76], présenté dans la figure 29, toutes les commandes de traitement concernant les données de production de DERs et le marché d'électricité sont concentrées dans un centre de contrôle. Ceci permet de faciliter et simplifier la gestion des DERs. Toutefois, avec l'expansion du VPP plus de DERs de différentes propriétés, la complexité des opérations au niveau du centre de contrôle s'accroît, et trouver la stratégie de contrôle optimale permettant de répondre aux besoins des clients devient une tâche délicate voire difficile.

Dans le contrôle hiérarchique, la complexité est allégée en la divisant verticalement, comme présenté dans la figure 30. Dans ce cas, le VPP est défini avec différents niveaux hiérarchiques. Chaque centre de contrôle local du VPP est chargé de superviser et de coordonner un nombre limité de DERs tout en déléguant certaines décisions vers le niveau supérieur du VPP. Cette architecture nécessite une communication de type P2P entre les différents centres de contrôle locaux du VPP. Enfin, dans les VPPs à contrôle entièrement distribué, tout DER a ses propres moyens de communication et de traitement afin de participer (et réagir) indépendamment et intelligemment dans l'état du système global. Dans, cette architecture, tout le système se base sur une communication de type P2P

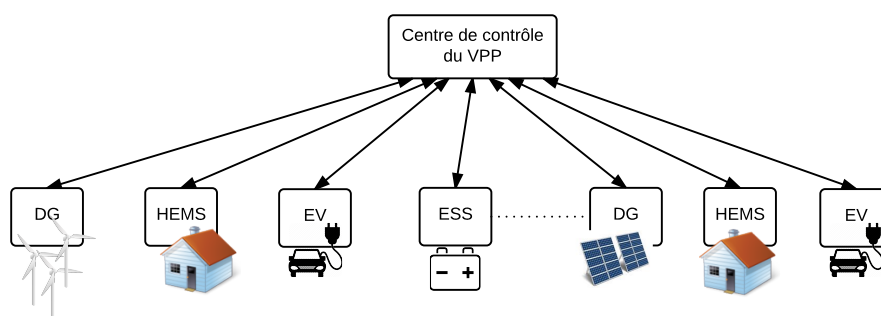


FIGURE 29 – VPP à contrôle centralisé

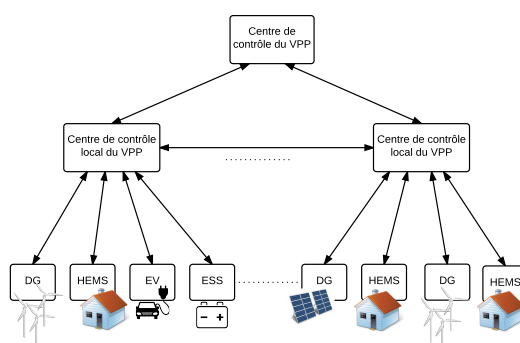


FIGURE 30 – VPP à contrôle hiérarchique

entre les différentes entités du VPP.

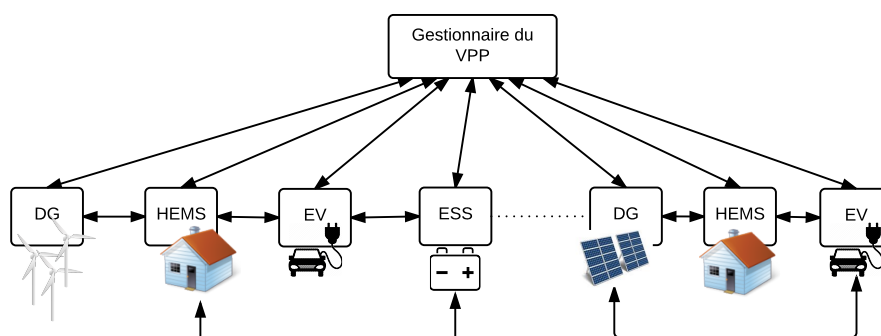


FIGURE 31 – VPP à contrôle entièrement distribué

Le tableau 3 résume les applications du NAN, et indique pour chacune le type

de communication exigé. Ainsi, le réseau NAN doit nécessairement supporter tout type de communication possible : MP2P, P2MP and P2P afin d'en supporter toutes les applications.

Passage à l'échelle

Le NAN est un réseau à structure particulièrement dynamique. En effet, il est composé de types différents de nœuds qui rejoignent le réseau de façon continue, comme les CIs, les nœuds capteurs intelligents, les collecteurs de données (DAPs), et aussi les sources d'énergie renouvelables. Selon [2], le nombre de nœuds connectés au réseau dans un emplacement donné pourrait varier en fonction de la densité de population dans cette zone. En effet, les zones urbaines ont une forte densité de clients, supérieure à 2000 nœuds par km^2 , alors que les zones rurales sont à faible densité, 10 nœuds km^2 [2]. Néanmoins, un NAN pourrait commencer avec un nombre limité de dispositifs et évoluer rapidement vers un réseau étendu composé de milliers de périphériques connectés [75]. L'arrivée des nouveaux clients et le déploiement de nouveaux dispositifs de communication peuvent apporter des difficultés techniques entraînant un coût élevé de maintenance et ainsi une dégradation des performances du réseau. Pour cela, le réseau doit être capable de s'adapter à tout changement d'ordre de grandeur tout en gardant le même niveau des performances. Une solution de communication pour les NANs doit permettre facilement à un seul nœud ou un groupe de nœuds de rejoindre ou quitter le réseau sans aucune intervention extérieure ou un coût de maintenance.

En conclusion, la scalabilité, extensibilité, auto-organisation et auto-configuration sont des caractéristiques à prendre en compte lors de la conception d'une solution de communication pour NAN.

Auto-guérison

Le déploiement du réseau de communication en parallèle avec l'infrastructure de réseau de distribution pose plusieurs défis. En effet, la plupart des dispositifs de communication sont installés à proximité de lignes électriques et des équipements de réseau de distribution. Ainsi, les liaisons sans fil peuvent être affectées par les interférences électromagnétiques ambiantes (EMI) produites par les équipements de réseau tels que les câbles électrique, les équipements de commutation de puissance [77]. De plus, le NAN est un réseau de capteurs et actionneurs sans fil en extérieur, les liens sans fil en plein air peuvent être affectés par les conditions climatiques (humidité, température élevée, pluie, *etc.*) [78] ainsi que par les obstacles physiques (bâtiments, arbres, véhicules en mouvement, *etc.*) tels que présenté dans la Figure 32 [79]. Tout ça entraîne

Applications	Description	schémas de communication exigés
Applications de lecture des compteurs	la lecture des compteurs sur demande ou planifiée, transfert en bloc de lectures de compteur	P2MP,MP2P
Applications de tarification	TOU, RTP, CPP	P2MP,MP2P
Services de pre-paiement	permet au client de d'acheter des services (par exemple d'électricité à l'avance)	P2MP,MP2P,P2P
Applications de DSM	la réduction de la charge pendant les périodes de pointe	P2MP,MP2P,P2P
Interruption de service/ opération valve	permet à l'opérateur d' activer ou de désactiver un service chez le client	P2MP,MP2P,P2P
DA	permet l'automatisation de contrôle et monitoring du réseau de distribution	P2MP,MP2P,P2P
Outage and restoration management	permet à l'opérateur de détecter et de localiser les pannes d'électricité pour réagir rapidement et isoler la panne si nécessaire afin de réduire sa durée et les coûts	P2MP,MP2P,P2P
Applications DERS	permet une meilleure intégration des DERSs dans le réseau	P2MP,MP2P,P2P
Transport électrique	gérer le flux d'électricité V2G et G2V	P2MP,MP2P,P2P
Les mises à jour des micrologiciels et les modifications des programme et des configurations	mettre à jour des micrologiciels et des configurations afin de corriger les bugs ou améliorer les caractéristiques des programmes qui fonctionnent dans les appareils, <i>etc.</i>	P2MP,MP2P,P2P

TABLEAU 3 – Les schémas de communication exigés par les applications du NAN [1]

l'instabilité des liaisons sans fil au sein d'un réseau NAN.

L'instabilité des liaisons sans fil peut mener à des déconnexions soudaines dans le réseau. Ce problème peut mener à des vides de communication au milieu du réseau. Les vides de communication peuvent aussi être causés par le déploiement éparés surtout dans les premiers stades du déploiement des NANs avec une faible densité, mais aussi la défaillance des nœuds en raison de l'épuisement de batterie ou une panne matérielle. Par conséquent, le réseau NAN doit être robuste à ces déconnexions inattendues. Ainsi, la solution de communication

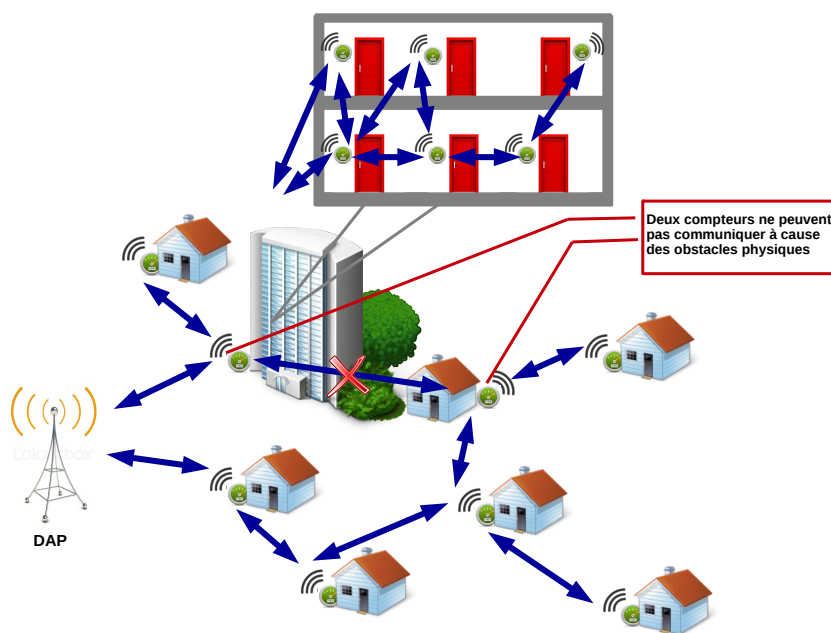


FIGURE 32 – Un exemple de perte de connexion en raison d'obstacles physiques

doit fournir une capacité d'auto-guérison afin de réparer rapidement ces problèmes sans intervention extérieure ni coût supplémentaire qui pourrait affecter le fonctionnement du réseau.

Utilisation des ressources

Le réseau NAN relie divers dispositifs de communication de différents types, de dispositifs de réseau ordinaires tels que des ordinateurs, des routeurs, des commutateurs à des compteurs intelligents, capteurs, DAPs, VEs, outils de contrôle du réseau de distribution, *etc.*... En particulier, les nœuds capteurs ont des ressources matérielles limitées en terme d'énergie, de capacité de calcul et de ressources mémoire. En outre, certains des capteurs seront déployés dans des

endroits qui sont difficiles à accéder, et les remplacer est une tâche très coûteuse, tels que les capteurs déployés sur les câbles souterrains [77]. La communication efficace en énergie ne concerne pas les nœuds capteurs seulement, mais aussi les équipements de réseau alimentés par le réseau lui-même, tels que les stations de base, les commutateurs et les routeurs. En fait, l'augmentation du nombre de ces équipements a entraîné des factures d'électricité élevées pour les opérateurs de réseau [80]. De même, certains des dispositifs du NAN ont une mémoire limitée, d'autres ont besoin de la mémoire disponible pour le traitement fonctionnel lié aux applications déployées. Par conséquent, une solution de communication pour NAN doit promouvoir une utilisation minimale des ressources en termes de mémoire et de consommation d'énergie.

Sécurité et confidentialité

Le déploiement des technologies de l'information et de la communication sur les réseaux électriques augmente le nombre de points d'interaction avec le réseau, ce qui expose les réseaux électriques intelligents aux menaces ciblant les systèmes d'information. Des problèmes de sécurité et protection des données ainsi que de confidentialité et respect de la vie privée s'imposent. De multiples risques doivent être considérés, notamment le piratage de données personnelles, l'usage frauduleux des moyens de communication, l'attaque sur les infrastructures de contrôle et de gestion du réseau électrique et le risque de perte ou de détournement des données de consommation [81]. Ici, nous ne nous sommes intéressés à la sécurité et la confidentialité des données qu'au niveau routage, plus particulièrement le routage dans le réseau de distribution NAN.

Les dispositifs d'un NAN sont déployés partout dans le réseau de distribution, qui est un environnement ouvert et exposé qui les rend sujets à des attaques et menaces. Au niveau de routage, les dispositifs du NAN doivent être protégés contre tout accès non autorisé qui peut conduire à la modification des données de routage (comme les tables de routages) stockées directement sur les dispositifs de communication. Ces actions, ainsi que l'usurpation d'identité, la modification ou la relecture des informations de routage lors de l'échange d'informations entre les nœuds sont des exemples d'attaques contre les protocoles de routage [65].

Un autre défi majeur dans le routage est la confidentialité des données transmises. Beaucoup de clients seraient inquiets d'exposer leurs données personnelles comme par exemple les profils de consommation d'énergie et les emplacements des véhicules électriques [65].

En conséquence, les protocoles de routage conçus pour les NANs doivent prendre en compte les exigences en sécurité et de confidentialité des applications du NAN.

Trafic des données	Délai maximum autorisé	Fiabilité
DA - données liées à la protection du réseau de distribution	<3 sec	>99.5%
DERS - données liées à la protection du réseau de distribution	<4 sec	>99.5%
Trafic critique des applications DA, DERS, DSM et AMI	<5 sec	>99.5%
Transport électrique	<10 sec	>98%
Trafic non critique des applications DSM et AMI	<15 sec	>98%
Trafic non critique des applications DA et AMI-	<30 sec	>98%
Trafic de configuration du réseau, trafic normal de l'application AMI	<5 min	>98%
trafic normal de l'application AMI	<4 h	>98%
Trafic de configuration du réseau	hours/days	>98%

TABLEAU 4 – Les exigences du NAN en termes de délai et fiabilité [1]

Qualités de Service (QoS)

En plus des exigences mentionnées ci-dessus, une solution de communication doit garantir les qualités de service requises par les applications. Généralement, les applications du SG, y compris les applications du NAN, sont des applications sensibles au temps et nécessitent une grande fiabilité et disponibilité, surtout pour les applications servant à la protection du réseau. D'une part, certaines applications exigent l'échange des données en temps réel comme les informations concernant les incidents et les perturbations dans les réseaux électriques, les signaux de tarification de l'électricité, les données d'équilibrage de charge, et les informations sur les défaillances de production d'électricité. D'autre part, certaines applications tolèrent les exigences en délai de livraison des données, ainsi les délais peuvent atteindre des heures, comme c'est le cas pour les lectures périodiques des CIs, voire des jours, comme c'est le cas pour la mise à jour du micrologiciel et de la configuration.

Le tableau 4 regroupe les qualités de services en termes de délai et fiabilité des applications du NAN en se basant sur les spécifications du NIST [1].

Routage dans les réseaux NAN

Dans cette section, nous dressons un état de l'art des principaux protocoles de routage proposés pour les communications au sein du NAN.

Dans la littérature, de nombreux protocoles de routage ont été proposés pour les communications au sein du NAN. En gros, ces protocoles appartiennent à deux grandes familles : le routage basé sur une structure d'arbre, et le routage géographique. Dans la première famille, on trouve Hybrid Routing Protocol (Hydro) [82], IEEE 802.11s [83] et RPL [84].

Hydro [82] est un protocole de routage multi-chemins pour les réseaux Low Power and Lossy Networks (LLN) qui utilise le concept de graphe orienté acyclique (DAG) pour fournir des routes multiples entre les nœuds du réseau et un nœud racine. La communication P2P est assurée à travers le nœud racine, autrement dit, les nœuds désirant envoyer un paquet à un nœud autre que la racine, doivent transmettre les paquets vers la racine, et puis la racine à son tour transmet les paquets à leurs destinations finales. Afin d'améliorer la fiabilité des chemins créés, le nœud racine maintient une vision globale de la topologie du réseau en collectant les rapports de topologie périodiquement créés et envoyés par chaque nœud du réseau. Hydro est un algorithme de routage fiable assurant tous les modes de communication possibles MP2P P2MP et P2P. Cependant, son fonctionnement en mode P2P est très basique et non-optimal, et résulte en l'utilisation de routes plus longues et donc en des retards plus importants dans la livraison des données. En outre, le processus de création et maintenance du DAG peut inonder le réseau par les paquets de contrôle surtout dans les cas des réseaux à grande échelle comme c'est le cas des réseaux NANs et ce problème peut affecter significativement les performances du réseau.

IEEE 802.11s [83] est un algorithme de routage multi-chemins pour les réseaux maillés sans fil (Wireless Mesh Networks (WMNs)) extension du standard IEEE 802.11. Il utilise Hybrid Wireless Mesh Protocol (HWMP) comme protocole de sélection des chemins. HWMP est un protocole hybride combinant deux types de routage : *tree-based proactive routing* et *on-demand routing*. Le premier mode de routage est utilisé pour créer et maintenir l'état du réseau sous la forme d'un arbre. Le deuxième mode est utilisé pour créer des nouvelles routes en cas où une ou plusieurs routes établis par le premier mode sont devenus invalides à cause des changements de la topologie, mais aussi pour assurer la communication P2P. En utilisant HWMP, IEEE 802.11s est capable d'établir des routes fiables, mais l'instabilité des liens peut affecter les performances du protocoles en générant un surcoût en termes de messages de contrôle par le processus de maintenance des routes [85]. Aussi, la quantité d'information stockée dans les nœuds pour maintenir l'état du routage (la structure d'arbre) augmente la complexité de l'algorithme affectant par la suite la durée de vie des nœuds [75].

RPL [84] est un protocole de routage spécialement conçu par l'Internet Engineering Task Force (IETF) Routing Over Low power and Lossy networks (ROLL) Working Group pour répondre aux besoins des réseaux LLN. Il consiste à maintenir l'état du réseau sous la forme d'un ou plusieurs DAGs. RPL est optimisé pour les communications de types MP2P et P2MP [84][86]. Pour cette raison, l'IETF l'a proposé comme la solution de routage pour les réseaux de AMI [87][88][89] où le trafic des données est limité des CIs vers un DAP et vice-versa. Ainsi, RPL est la base de plusieurs recherches dans ce contexte et plusieurs implémentations ont été proposées pour mieux répondre aux exigences des réseaux NANs. La version décrite dans [90] est un RPL à multiples instances avec une différenciation de QoS pour prendre en compte les exigences des applications du NAN. Dans [91], une version améliorée de RPL a été proposée pour supporter les cas des AMIs à multiples DAPs. En fait, le standard RPL définit une seule instance RPL avec différents DAG disjoints, chacun correspondant à une racine. Pour cela, le *multi-gateway RPL* permet à un nœud de rejoindre plusieurs DAG afin d'augmenter les options de routage viables [91]. CORPL [92] est une variante de RPL proposée pour les réseaux AMI qui adresse le problème d'instabilité des liaisons sans fils et l'effet des interférences.

La deuxième catégorie regroupe les protocoles de routages géographiques proposés pour les NANs. Les travaux de recherche qui ont mené à proposer des protocoles de cette catégorie, se sont concentrés sur les spécificités physiques des NANs. En effet, puisque les positions géographiques des dispositifs du NAN sont connues *a priori*, le routage géographique a été largement proposé pour les NANs. [93] introduit un routage géographique, initialement conçu pour les WSN, adapté pour les NANs utilisant CPL comme infrastructure de communication. Beacon-less Routing (BLR) [94], Beacon Based Routing (BBR) [95], et Implicit Geographic Forwarding (IGF) [96] ont été également proposés pour les NANs. Le Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR) [34] a été considéré comme un des meilleurs candidats pour le routage dans SG, en particulier dans NAN [97]. En effet, en plus des avantages du routage géographique, GPSR permet de garantir la livraison de données.

Pour résumer, parmi tous ces protocoles, RPL et GPSR ont été identifiés comme les protocoles de routage les plus pertinents pour les NANs [98]. D'ailleurs, plusieurs recherches ont étudié l'applicabilité et ont analysé les performances de RPL et GPSR dans le contexte des NANs [99][100][101][98]. Dans ce qui suit, nous décrivons en détails le principe de fonctionnement de chacun de ces deux protocoles dans le but de discuter les avantages qu'ils apportent pour les NANs, ainsi que les inconvénients qui peuvent limiter les performances du réseau.

Le protocole RPL

Comme déjà dit, Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks (RPL) [84] est un protocole de routage standard conçu par l'IETF pour répondre aux besoins des réseaux LLN. Son principe de fonctionnement consiste à créer des sous-graphes appelés Destination Oriented Direct Acyclic graphs (DODAGs) du graphe principal du réseau. Un DODAG définit les routes entre l'ensemble des nœuds du réseau et un nœud racine sous la forme d'un arbre. Un réseau RPL contient au moins une instance RPL qui elle-même se compose d'un ou plusieurs DODAGs. Chaque instance RPL est associée à une fonction objectif (OF) qui permet d'optimiser la topologie en fonction d'un ensemble de contraintes et/ou de métriques. Un nœud peut faire partie d'un seul DODAG par instance, mais peut participer à plusieurs instances simultanément. La construction et la maintenance des DODAGs sont réalisées grâce à 3 types de message de contrôle : *DODAG Information Solicitation* (DIS), *DODAG Information Object* (DIO) et *Destination Advertisement Object* (DAO). Un nouveau nœud peut rejoindre un réseau déjà formé en diffusant un message DIS pour annoncer sa présence afin de solliciter en réponse un message DIO contenant des informations sur le DODAG comme le numéro de version et l'identifiant du DODAG, l'identifiant de l'instance et l'OF utilisée pour calculer son rang. Un nœud peut également attendre de recevoir un message DIO diffusé périodiquement par ses voisins. Le rang d'un nœud correspond à son emplacement dans le graphe par rapport à la racine en nombre de sauts. La valeur du rang augmente toujours en descendant dans le graphe. C'est donc la racine qui a le rang le plus petit dans le graphe [102]. Dans le cas où un nœud reçoit plusieurs DIOs issus des voisins différents, il choisit l'émetteur avec le meilleur rang (le plus petit donc) comme le parent préféré vers lequel seront envoyés tous les messages à destination de la racine. À la fin de ce processus seulement les routes ascendantes, i.e. des nœuds du réseau vers le nœud racine, sont construites.

Pour établir les routes descendantes, tout nœud envoie un message DAO à son parent contenant le préfixe des nœuds situés dans son DODAG. Lorsque le message se propage vers la racine, les préfixes sont agrégés et les routes descendantes sont alors disponibles pour les parents.

Dans le cas des ruptures de liens et/ou de défaillances de certains nœuds, RPL utilise deux mécanismes de réparation : la réparation locale et globale. Quand un nœud détecte une défaillance d'un lien ou d'un nœud voisin, il déclenche une phase de récupération locale afin de trouver rapidement un chemin alternatif vers la racine du DODAG. Cette phase consiste à chercher un autre parent pour transférer ses paquets. Si aucun autre parent n'est disponible, le nœud cherche alors un nœud frère, i.e., un nœud de même rang, permettant la connexion avec le nœud racine afin de transmettre le paquet. La réparation locale est accom-

plie en utilisant les messages DIOs [103]. Les processus de réparation locale permettent de modifier la structure du DODAG, Ce dernier peut s'écarter de sa forme optimale, ainsi sa reconstruction devient nécessaire. Cette phase de reconstruction est appelée réparation globale. La réparation globale permet la reconstruction complète du graphe en incrémentant le numéro de version du DODAG. Initialement déclenchée par le nœud racine, la phase de récupération globale est un mécanisme périodique, mais aussi événementiel [104]. Cette phase permet sans doute d'éliminer les incohérences et les boucles existantes dans le DODAG, de mettre à jour et optimiser les routes et de synchroniser les informations concernant le DODAG mais ceci est accompli avec un coût non négligeable [101].

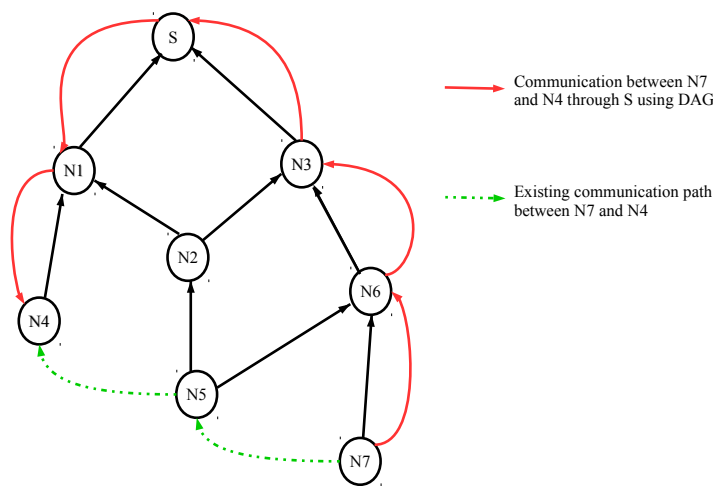


FIGURE 33 – La communication P2P en utilisant le routage RPL

Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR)

GPSR, pour Greedy-Perimeter Stateless Routing, appelé également GFG pour Greedy-Face-Greedy, est un protocole de routage géographique dont le principe de fonctionnement consiste à basculer, si nécessaire, entre deux modes de routage ; le mode *greedy forwarding* et le mode *Face routing*. Le deuxième mode est utilisé comme un mécanisme de récupération en cas d'échec du mode *greedy* face à une impasse. Dès lors que l'impasse est dépassée, le protocole repasse en mode *greedy*.

Le mécanisme d'acheminement du mode *Face routing* est de transmettre les

paquets en utilisant la règle de la main droite sur les *faces* d'un graphe planaire. La figure 34 présente un exemple de *face routing* où S a un paquet à envoyer à D , le prochain saut élu est le nœud successeur de S à dans le sens inverse des aiguilles d'une montre à partir de la ligne virtuelle (SD). Le prochain saut est alors N_2 . Par la suite, en suivant la règle de la main droite, quand un paquet arrive du nœud N_j à un nœud donné N_i , le prochain saut à être élu est le nœud successeur de N_i dans le sens inverse des aiguilles par rapport au N_i à partir du lien $\overrightarrow{N_i, N_j}$.

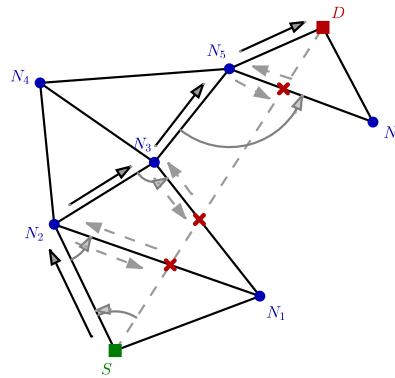


FIGURE 34 – Face routing

En utilisant GPSR, comme tout protocole de routage géographique, chaque nœud effectue le même algorithme, la décision d'acheminement des paquets est obtenue en utilisant seulement des informations locales : la position géographique du nœud courant, celle de la destination et celle des nœuds disponibles dans le voisinage au moment de la demande d'acheminement. Ainsi, GPSR est entièrement distribué et local ce qui réduit significativement le coût de communication nécessaire pour la construction des chemins et aussi la complexité du processus de routage. On n'a plus, donc, besoin de construire ni de maintenir des tables de routage. Un nouveau nœud peut rejoindre facilement le réseau par l'échange local d'informations avec les nœuds existants dans son voisinage. Grâce à ces avantages, GPSR est capable d'assurer le routage dans des réseaux très étendus tout en conservant uniquement les informations du voisinage à chaque nœud. Ce qui conduit GPSR à une bonne évolutivité/scalabilité puisqu'il n'est pas nécessaire de maintenir les tables de routage mises à jour ou d'avoir une vue globale de la topologie du réseau et de ses changements.

Discussion

Les performances de RPL ainsi que celles de GPSR dans les réseaux NANs ont été largement étudiées et comparées [99][100][105]. Dans ces travaux, les simulations ont prouvé que RPL est plus performant que GPSR en terme de délais de bout-en-bout et de fiabilité de délivrance des données. Cependant, ces études comparatives ont étudié les performances de ces deux algorithmes dans les cas des NAN avec uniquement deux paradigmes de communication P2MP et MP2P. Dans ce cas, il est évident que RPL soit plus performant que GPSR. D'une part, le fonctionnement pro-actif de RPL profite de ce cas particulier de communications et réduit significativement l'*overhead* généré en termes de paquets de contrôle pour la recherche de route. En effet, RPL lance le processus d'établissement de routes une seule fois au début, les routes entre le nœud racine et les nœuds terminaux (endpoints) sont préétablies et stockées dans les tables de routage des nœuds avant de commencer le routage des données. D'autre part, pour GPSR, les communications P2MP et MP2P mettent l'accent sur ses limites. En utilisant le protocole GPSR, on n'a pas de phase d'établissement de routes, la décision de routage est faite au moment de l'acheminement des paquets de données. Mais, si la même route est utilisée plusieurs fois, le même processus de routage est répété tant que la route est utilisée, y compris le processus de réparation. Utiliser une route plusieurs fois est très fréquent dans les communications de types MP2P et P2MP. Ainsi, l'*overhead* généré par un seul processus de réparation sera multiplié par le nombre de fois où la route est utilisée, ce qui, dans le cas des réseaux NAN avec un énorme flux de données de types P2MP et MP2P, va perturber significativement le fonctionnement du réseau et résulter ainsi la dégradation des performances du réseau.

Par contre, ces études n'ont pas traité le cas de communications P2P. Ce type de communication gagne de plus en plus d'importance, surtout avec la migration progressive vers l'architecture distribuée et le développement de plusieurs applications à contrôle distribué [61][106][107][108]. Au contraire de GPSR, RPL n'est pas optimisé pour la communication P2P [89]. Quand un nœud veut envoyer un paquet à un autre nœud que la racine, le paquet suit le chemin ascendant vers la racine jusqu'à arriver à un parent commun et puis il utilise le chemin descendant vers le nœud destination. Suivre un long détour affecte sans doute les performances du protocole, et surtout pour les applications qui sont très sensibles aux délais, ce qui est le cas des plupart des applications du NAN.

Un autre problème que peut poser l'utilisation de RPL dans le contexte des NANs est la quantité de messages de contrôle utilisée dans les processus d'établissement et de maintenance des DODAGs et aussi dans les processus de réparation. Dans le cas particulier du NAN qui est un réseau à structure très dynamique et un environnement très sévère pour les liaisons sans fil, RPL devient très coûteux

en termes de paquets de contrôle et de l'utilisation des ressources. De ce côté, GPSR, étant entièrement distribué, local, sans mémoire et évolutif, devient plus convenable pour le cas particulier des réseaux NANs.

Nous proposons ainsi l'utilisation de GRACO pour les réseaux NANs. Tout d'abord, GRACO supporte tout type de communication MP2P, MP2P et P2P, ce qui permet de palier le problème de RPL dans le cas de communications P2P. En outre, GRACO permet de remédier aux problèmes de GPSR dans le cas des communications MP2P et MP2P. En effet, comme nous l'avons prouvé dans le chapitre I, le processus de réparation de GRACO permet d'éviter le déclenchement de la réparation à chaque processus de routage comme c'est le cas des protocoles de type greedy-face-greedy y compris GPSR. Enfin, GRACO, étant un protocole de routage géographique, il répond aussi aux exigences du NAN en termes de scalabilité, auto-configuration et auto-organisation pour faire face à la dynamique du réseau, et auto-guérison pour récupérer efficacement de l'instabilité des liaisons sans fil qui est un problème très fréquent dans le NAN. Dans la section suivante, nous allons montrer que GRACO est convenable pour le routage des données dans les NANs à travers des simulations dans des conditions réalistes.

Évaluation des performances de GRACO dans le contexte du SG-NAN

Afin d'évaluer la pertinence de GRACO pour les réseaux SG NANs, nous avons effectué des simulations en utilisant des paramètres définis par NIST dans *NIST Priority Action Plan 2 Guidelines for Assessing Wireless Standards for Smart Grid Applications* [2]. Dans cette configuration, nous étudions l'effet du modèle de propagation dans l'environnement du canal ainsi que l'impact des collisions au niveau MAC sur les performances du protocole de routage proposé.

Nous choisissons le simulateur WSNNet [109]. WSNNet fournit une implémentation réaliste des couches physique et liaison (MAC) ainsi qu'une implémentation des différents modèles de propagation.

Pour mesurer la robustesse du protocole de routage proposé, nous évaluons la capacité du mécanisme de réparation proposé dans GRACO dans la délivrance de trafic de données autour des régions vides. Les vides de communication dans un réseau sans fil peuvent être causés par le déploiement de zones à très faible densité ou carrément vides, mais aussi par la défaillance des nœuds, des obstacles physiques et de l'instabilité des liens sans fil surtout dans un environnement extérieur. Ces problèmes sont très fréquents dans le cas particulier des réseaux NANs.

Les résultats obtenus révèlent la robustesse de GRACO face à ces problèmes qui améliore la résilience du réseau en ajustant de façon adaptative le mécanisme d'acheminement de données. La capacité de GRACO à récupérer des vides et à délivrer avec succès les paquets des données sans aucune coordination externe ni connaissance globale prouve ses capacités d'auto-guérison et d'auto-organisation. Les résultats obtenus démontrent également la flexibilité de GRACO contre toute extension possible du réseau. Les performances de GRACO en termes de taux de livraison et les délais répondent aux exigences des applications du NAN spécifiées dans la section II.

Topologie et scénarios de déploiement (recommandation de NIST)

Un NAN peut être modélisé comme étant un réseau de n nœuds communicants. Les scénarios de déploiement des nœuds sont basés sur les spécifications du NIST [2]. Un nœud peut être un CI doté des capacités de communication et d'autres logicielles pour la gestion et le traitement des données, un capteur, ou tout autre équipement de mesure communicant. Chaque nœud dispose d'un module de communication radio responsable de relayer des données (mesures de tension, courant, phase, la consommation d'énergie, *etc.*...) vers les DAPs ou un autre nœud destination directement ou en utilisant un chemin multi-sauts. Ainsi, chaque nœud agit comme un dispositif *endpoint*, mais aussi comme un routeur pour relayer le trafic des données vers les autres nœuds et former un réseau maillé. Les nœuds sont alors en mesure de fonctionner en modes de communication P2P, MP2P and P2MP. Les nœuds sont déployés aléatoirement dans une surface de 1 km^2 de grandeur. Nous choisissons d'ajouter progressivement des nœuds au réseau afin de simuler l'évolution du NAN des premiers stades du déploiement du réseau avec un nombre réduit d'appareils communicants éparpillés dans la région sélectionnée à des stades plus avancés avec un déploiement dense de dispositifs de communication représentant une version plus étendue du NAN.

Dans le but d'étudier l'impact des zones vides sur les performances de l'algorithme de routage proposé, nous choisissons un ensemble de sources et destinations aléatoires où il y a nécessairement un vide à être contourné lors du routage des données. Un paquet de données est envoyé entre une paire de nœuds (source, destination) toutes les 10 s.

La performance du protocole de routage est mesurée en termes de longueur moyenne des routes, de délais de bout-en-bout et du taux de livraison des données. La longueur d'une route est définie par le nombre de sauts qu'un message de données a parcouru pour aller de la source à la destination. Le délai de bout-en-bout est l'intervalle de temps entre l'instant où une source donnée envoie un paquet et l'instant où il la destination le reçoit. Le taux de livraison est le nombre

de messages reçus divisé par le nombre de messages envoyés pour l'ensemble du réseau.

Modèle du canal

En se basant sur les spécifications du NIST [2], la propagation des signaux dans l'environnement du NAN est caractérisée par un coefficient de *path loss* α et un *shadowing* χ_σ . Le *path loss*, ou affaiblissement dû à la distance, modélise l'affaiblissement de la puissance captée au récepteur en fonction de la distance qui le sépare de l'émetteur ; plus la distance est grande plus la puissance captée est faible. La distribution de puissance au récepteur suit une loi log-normale, due au *shadowing* χ_σ avec un écart type σ . Le *shadowing* modélise un affaiblissement probabiliste en fonction du milieu de propagation comme les contraintes liées aux obstacles. Le modèle de propagation de canal peut être présentée comme suit :

$$P_{rx}[dBm] = P_{tx}[dBm] - 10 \alpha \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + \chi_\sigma \quad (5)$$

où P_{tx} est la puissance transmise, P_{rx} est la puissance reçue, d est la distance entre l'émetteur et le récepteur, et $d_0 = 1 \text{ m}$.

NIST définit dans [2] trois types d'environnement pour NAN, variant du moins difficile au plus difficile en termes de portée et de la stabilité de signal dans le but de simuler l'impact de l'environnement RF sur les communications au sein du NAN. Le premier type est l'environnement rural caractérisé par un faible *path loss* et un *shadowing* à faible variance. Les deux autres types, notamment suburbain et urbain, sont plus contraints en termes de *path loss* et *shadowing*. Le tableau 5 résume les paramètres des ces trois environnements selon NIST [2].

Environnement	densité (nœuds/ km^2)	Coefficient de path-loss α	Écart type σ
Zone rurale	10	2.1	2.2
Zone suburbaine	800	2.7	7.4
Zone urbaine	2000	3.6	7.4

TABLEAU 5 – Paramètres du canal pour trois environnements à 2.4 GHz[2]

Dans le but d'évaluer la robustesse de GRACO, nous choisissons de simuler ses performances dans un milieu urbain, étant l'environnement le plus difficile pour les communications sans fil. Dans ce cas particulier, NIST recommande de simuler des réseaux avec une densité moyenne de 2000 *nodes/km*². Dans nos simulations, nous adoptons une densité croissante autour de la densité moyenne recommandée pour imiter le processus d'expansion du NAN afin d'évaluer

l'aspect scalabilité du protocole.

Les nœuds ont une portée de communication de $R = 50m$. Nous sélectionnons une puissance radio transmise P_{tx} suffisante pour assurer une couverture de 95% d'un cercle de rayon $50m$. La zone de couverture est définie comme le pourcentage de la superficie à l'intérieur d'un cercle qui est capable de recevoir une puissance supérieure ou égale à une puissance minimale donnée [110]. La zone de couverture est calculée en utilisant l'équation 6.

$$C = Q(a) + e^{\frac{2-2ab}{b^2}} Q\left(\frac{2-ab}{b}\right) \quad (6)$$

où $a = \frac{P_{min}-P_{rx}(R)}{\sigma}$, $b = \frac{10\alpha \log(e)}{\sigma}$ et Q – *function* est la probabilité qu'une variable aléatoire gaussienne obtiendra une valeur supérieure à x écarts-types au-dessus de la moyenne [110].

Couche physique (PHY) et Couche MAC

La couche physique (PHY) est chargée de transporter les données entre deux entités communicantes à travers un support physique. La couche MAC, pour *Medium access control*, est responsable de la gestion du contrôle d'accès et du partage du canal entre les différents nœuds qui désirent communiquer afin de réduire les collisions tout en facilitant la réutilisation de canaux. La couche MAC est aussi chargée de mettre en œuvre les stratégies de mise en veille [111].

Les standards IEEE 802.11 [2] et IEEE 802.15.4 [112] ont été proposés pour le SG. IEEE 802.15.4 a été spécialement conçu pour les réseaux sans fil LR-WPAN, pour *Low Rate Wireless Personal Area Network*, où les dispositifs communiquent à faible consommation et à faible débit. Tandis que le standard IEEE 802.11 a été conçu pour l'utilisation administrée ; les nœuds terminaux communiquent entre eux par le biais d'une borne d'accès administrant une zone géographique [113]. Le travail dans [112] présente une évaluation des performances de plusieurs protocoles MAC. Cette étude a prouvé que les performances de IEEE 802.15.4, en termes de consommation d'énergie et le taux de délivrance, sont supérieures à celles des autres protocoles MAC, y compris le IEEE 802.11.

Dans le cas des réseaux NANs, l'infrastructure de communication doit assurer tous les modes de communication, et surtout la communication P2P. De plus, le taux de livraison des données est l'une des exigences primordiales pour les communications de SG en général, et en particulier NAN. Pour ces raisons, dans nos simulations, nous faisons l'hypothèse que les nœuds utilisent le standard IEEE 802.15.4 au niveau des couches physique et MAC. La bande fréquence utilisée est 2.4 GHz [2].

La tableau 6 liste les paramètres de simulations.

Déploiement	Environnement	urbain
	Nombre de nœuds	$n = 500, 800, 1000, 2000, 4000$
	Taille du domaine	1 km^2
	Distribution	uniformément aléatoire
	Portée de communication	$R \simeq 50m$
canal sans fil	Coefficient de path-loss	$\alpha = 3.6$
	Shadowing	Log-Normal Shadowing, écart type $\sigma = 7.4$
Couches PHY et MAC	Standard	IEEE 802.15.4
Couche NET	Routage	GRACO

TABLEAU 6 – Paramètres de simulation

Le réseau utilisé dans les simulations est présenté dans la figure 35. La figure 35 montre les différentes étapes de l'expansion du réseau.

Résultats des simulations et Discussion

Les résultats de simulations montrent que plus le réseau est dense, meilleures sont les performances du protocole GRACO comme on pouvait s'y attendre. La figure 36 montre l'évolution de la longueur du chemin de routage – en nombre de sauts – en fonction de la densité du réseau. On constate que les chemins utilisés deviennent plus courts quand la densité du réseau accroît. En effet, avec plus de nœuds disponibles dans le réseau, on a généralement moins de zones vides ainsi l'algorithme utilise moins souvent le processus de récupération ce qui permet d'éviter les longs détours, et aussi on a plus de chance de trouver le chemin direct. De plus, le mode glouton tend à trouver des chemins plus courts, car dans les réseaux denses, on a plus la probabilité de trouver des nœuds plus proches de la destination dans la zone de progrès positif dans les réseaux denses que dans les réseaux à faible densité. De même pour le mode de récupération, on a plus de probabilité de trouver des nœuds dans les zones les plus proches de la destination dans les réseaux denses que dans les réseaux à faible densité, ce qui permet de réduire considérablement la longueur des chemins. Plus précisément, comme présenté sur la figure 36, la longueur moyenne des chemins baisse de 48% ; de 19.86 sauts pour la densité $500/\text{km}^2$ à 10.41 sauts pour la densité $4000/\text{km}^2$.

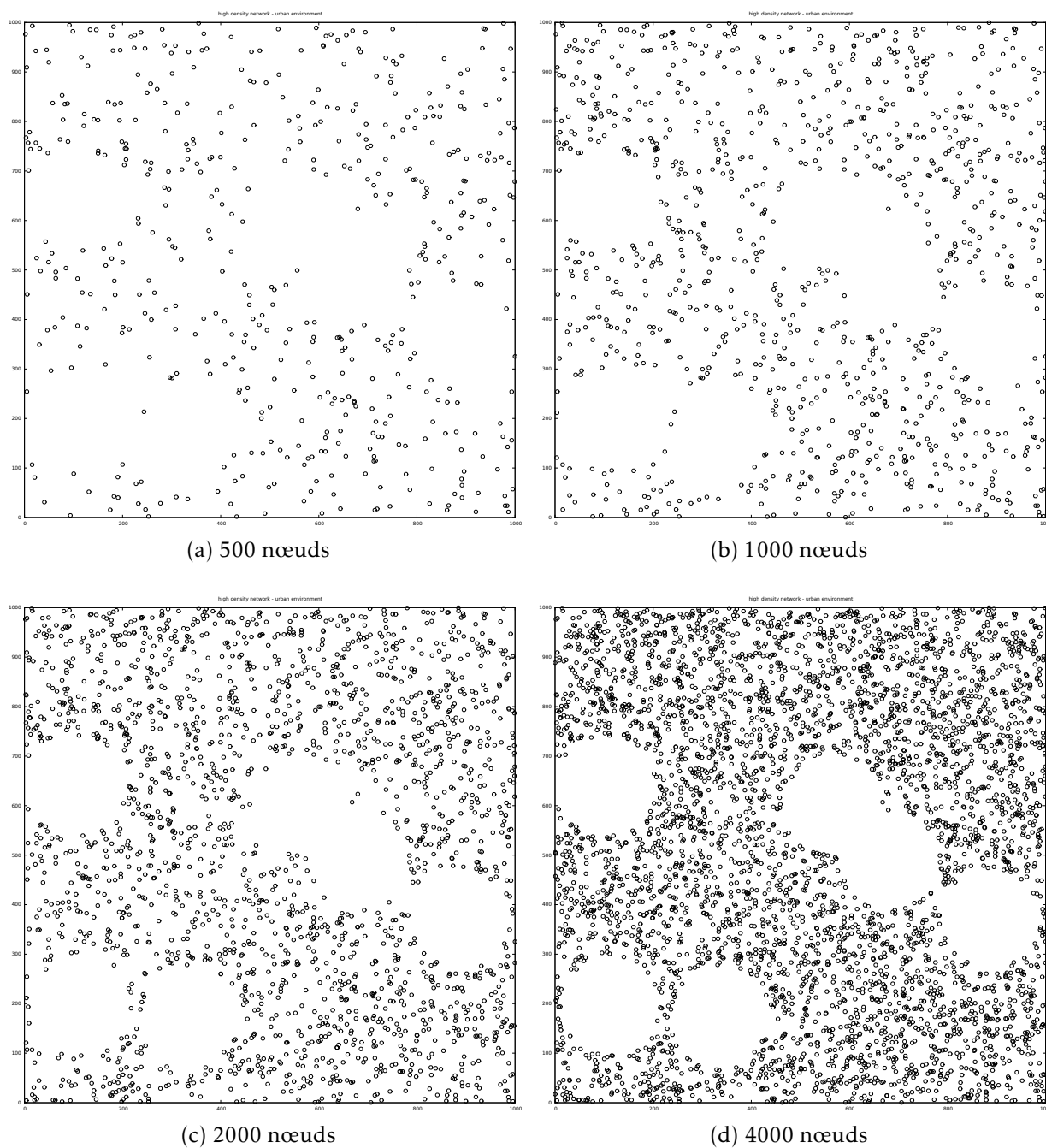


FIGURE 35 – Étapes d'extension d'un réseau NAN dans une région urbaine

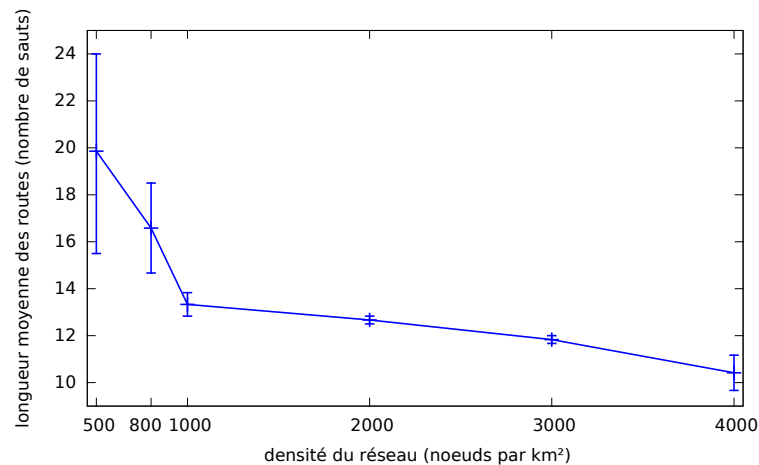


FIGURE 36 – Longueur moyenne des routes en fonction de la densité du réseau

On constate sur la figure 36 que la variation du nombre de sauts diminue quand la densité augmente. Toutefois, dans le cas de 4000 nœuds, la variation augmente. En fait, ce phénomène n'est pas régulier, ceci est causé par l'état imprévisible des liaisons sans fil. Dans quelques rares cas, une partie du réseau peut être déconnectée, ainsi pour acheminer les données, les paquets ont besoin de suivre de longs détours. Néanmoins, GRACO est capable de trouver un chemin, s'il existe au moins un, peu importe l'état du réseau.

La figure 37 illustre la variation des délais de bout-en-bout en fonction de la densité du réseau. Le délai de bout-en-bout moyen diminue de 30% ; de 86,24 ms à une densité 500/km² à 56,77 ms à une densité 4000/km². Les délais de bout-en-bout mesurés avec GRACO satisfont les exigences des applications NAN [72]. En fait, comme présenté dans le tableau 4, dans le cas le plus critique, le paquet de données doit être délivré dans un délai de bout-en-bout maximum de 3s qui est beaucoup plus élevé que le pire délai mesuré par simulations qui est de 86,24 ms.

Le taux de livraison de données est également amélioré en augmentant la densité du réseau, tel que présenté sur figure 57. Pour une couche MAC et une couche PHY idéales, le protocole GRACO est capable de trouver des chemins valables et de délivrer 100 % des paquets de données envoyés dans les délais requis. Comme attendu, pour une couche MAC et une couche PHY réalistes, le taux de livraison diminue à cause des collisions et l'aspect très variable du modèle de propagation du signal utilisé surtout pour l'environnement urbain avec un écart type important. Toutefois, le taux de livraison des données est amélioré pour atteindre 71.4% avec une densité de réseau 500/km² à 100% à une densité de réseau 4000/km². Ceci est expliqué par la disponibilité de plus de routes alternatives si l'un échoue

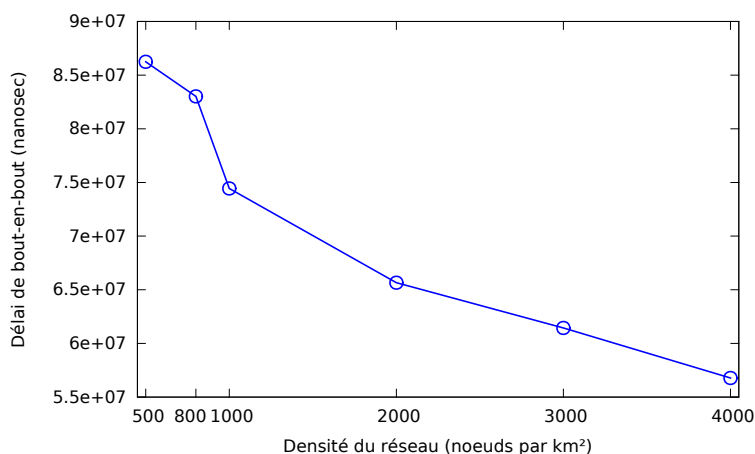


FIGURE 37 – Délai de bout-en-bout en fonction de la densité du réseau

à délivrer les données.

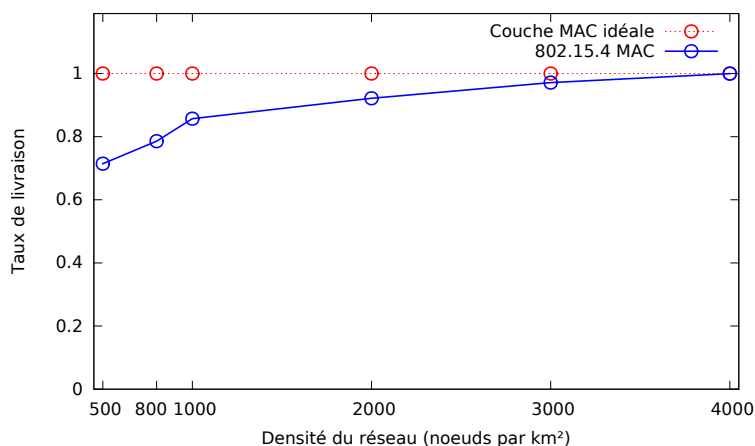


FIGURE 38 – Taux de livraison en fonction de la densité du réseau

Pour conclure, nous avons évalué les performances de GRACO dans des environnements difficiles typiques du NAN. En effet, nous avons combiné les vides de communication physiques et des liaisons sans fil hautement variables dans nos simulations. Les résultats des simulations ont prouvé la robustesse de GRACO face à ces problèmes. Les aspects auto-guérison et auto-organisation de GRACO ont amélioré la résilience du réseau par l'ajustement adaptatif du processus de routage de données pour réparer des vides et délivrer avec succès les paquets de données sans aucune coordination externe ni la connaissance globale. Nous

avons montré que GRACO est un protocole de routage évolutif, il est capable de s'adapter à l'expansion du réseau. Ses performances sont améliorées avec la densité croissante du réseau. GRACO obtient les taux de livraison requis (taux de livraison > 98 %) dans les réseaux suffisamment denses qui garantissent la présence d'au moins un chemin possible entre S et D. Les délais de bout-en-bout mesurés avec GRACO sont également au dessus des délais maximums autorisés exigés par les applications du NAN.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé l'utilisation de GRACO comme protocole de routage pour les réseaux NAN. Nous avons commencé par étudier les exigences de communication de ce type particulier de réseau considérant les schémas de communication imposés par les stratégies de contrôle, les qualités de service (QoS) requises par les applications du NAN et les exigences liées aux caractéristiques physiques des NANs. Ensuite, nous avons analysé les principaux protocoles de routage proposés pour les NANs, notamment le standard RPL et le protocole GPSR. Ces deux protocoles présentent plusieurs avantages pour ce type très particulier de réseau mais aussi des limites qui peuvent influencer son fonctionnement, comme les paradigmes de communication permettant le développement des applications et services avec différentes politiques de contrôle telles que le contrôle distribué. En revanche, le protocole de routage proposé, GRACO, offre la flexibilité et les aspects d'auto-organisation, d'auto-configuration et d'auto-guérison pour faire face à la nature dynamique du NAN en particulier dans les milieux urbains. Comme une contribution majeure, nous avons évalué l'algorithme de routage dans un environnement urbain avec des conditions réalistes définies par NIST. Les résultats de simulation ont montré que GRACO est évolutif et capable de s'adapter à tout changement dans la topologie du réseau. Ses performances sont améliorées avec la densité croissante du réseau. Néanmoins, les données routées dans le NAN sont de différentes natures, leurs exigences en termes de qualités de service varient largement. Ainsi, elles doivent être traitées différemment. Afin d'y pallier, nous proposons une nouvelle version de GRACO qui tient compte de la nature pour ajuster de façon adaptative le processus de routage en fonction des qualités de service requises.

*

QoS-GRACO : routage géographique avec prise en compte de la qualité de service pour les réseaux NAN

Le routage des données sur les réseaux NAN présente un enjeu stratégique pour les gestionnaires de réseau et les fournisseurs de services au vu des nouvelles fonctionnalités introduites par le concept SG dans le segment de distribution. Dans le chapitre précédent, nous avons proposé l'utilisation de GRACO pour les réseaux NAN. Nous avons montré que GRACO offre les caractères évolutivité, flexibilité et scalabilité ainsi que les aspects auto-organisation, auto-configuration et auto-guérison pour faire face aux particularités du NAN. Cependant, la coexistence de multiples applications crée d'autres contraintes sur le routage de données. En effet, la transmission des données de natures différentes, qui peuvent être critiques dans certains cas, dans le même réseau, rend nécessaire la mise en place d'un protocole de routage qui tient compte des exigences et particularités de chaque application. La transmission des données en respectant les délais exigés et avec un maximum de fiabilité permet une exploitation plus efficace de ces données, ce qui améliore ainsi la fiabilité du réseau d'électricité. Pour ces raisons, nous proposons, dans ce chapitre, QoS-GRACO, une version du protocole de routage GRACO prenant en compte les QoS du trafic du NAN. Nous commençons par étudier le trafic du réseau NAN dans le but de définir les QoS exigées. Nous expliquons par la suite le fonctionnement du nouvel algorithme QoS-GRACO. Enfin, nous évaluons les performances de QoS-GRACO dans le contexte des réseaux NAN.

Exigences en QoS des applications du NAN

Dans le réseau NAN, différentes applications (contrôle des éléments du réseau, surveillance périodique de la qualité de l'alimentation, lecture des compteurs, etc...) coexistent et ont des exigences différentes en qualité de service en termes de délais, fiabilité, ce qui devrait être pris en compte dans la conception

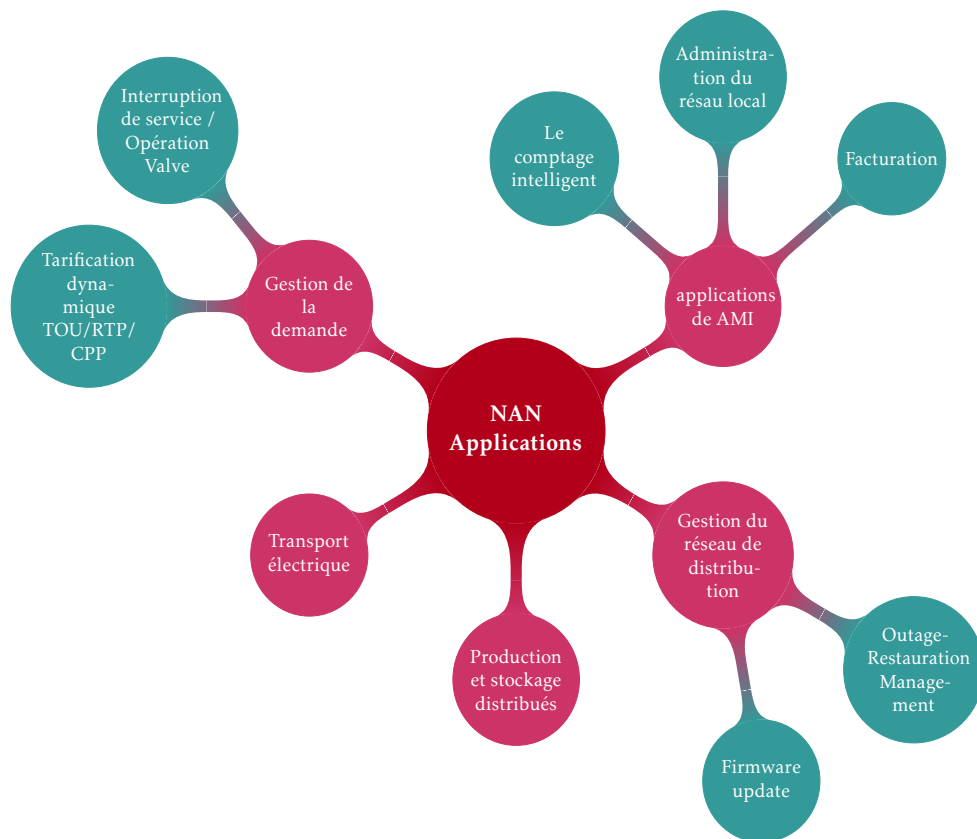


FIGURE 39 – Les applications du NAN

du protocole de routage. Dans le but de classer le trafic des données du NAN, nous étudions, dans cette section, le trafic prévu d'être acheminé sur le NAN.

Modélisation du trafic du NAN

Le flux de trafic NAN est très dynamique. La quantité de trafic sur les liaisons réseau à tout moment dépendra de plusieurs paramètres, tels que l'état du réseau ou du système (fonctionnement normal / critique), le calendrier, l'heure, la demande, *etc.*... La majorité des nouvelles applications du SG va être développée au niveau du NAN. Ces applications, présentées dans la figure 39, ont des exigences de qualité de service différentes. Même les trafics de données d'une seule application peuvent exiger différentes qualités de services selon le type de données échangées.

En se basant sur [1], le flux des données du NAN peut être classifié en quatre types de paquets : *commande*, *données*, *alerte* ou *alarme*. Les paquets de type *com-*

mande peuvent être des requêtes pour demander certaines données ou mesures ou encore des commandes de contrôle des dispositifs du réseau. Les paquets *données* couvrent les mesures périodiques, les réponses aux commandes, les paquets d'acquiescement (ACK). Les paquets *alerte* sont généralement des notifications, comme les notifications de changement d'état d'un dispositif ou encore qu'il fonctionne en dehors de ses limites normales, comme par exemple la chute de tension du système sous un niveau prédéterminé. Les paquets de type *alarme* sont généralement plus critiques que les alertes, ils notifient un dysfonctionnement de certains dispositifs quand les conditions de seuil sont dépassées à cause des pannes comme les pannes d'électricité et les coupures de courant.

En général, le trafic NAN dépend de l'état global du système. En effet, le trafic des données circulant sur le réseau dans des conditions normales de fonctionnement de la grille diffère de celui dans les conditions critiques. Comme déjà décrit, le trafic normal comprend des mesures périodiques, le contrôle des données de détection et d'événements asynchrones, qui sont dans la plupart du temps MP2P, les données et de commande de types P2MP, et le trafic P2P.

Souvent, certains flux de données correspondant aux conditions normales du réseau doivent être maintenus malgré les conditions critiques, telles que les mesures périodiques. Par contre, d'autres trafics des conditions normales peuvent être suspendus pendant le fonctionnement du réseau des conditions critiques jusqu'à ce que les opérations soient de retour à la normale, telles que les mises à jour du firmware et des commandes de configuration.

En revanche, dans les conditions critiques, une certaine charge de données supplémentaire peut être ajoutée, comme par exemple le trafic supplémentaire produit par ré-inscription des compteurs au AMI head end ou du système de gestion des données des compteurs (*Meter Data Management System (MDMS)*) après un blackout ou une panne.

En outre, le trafic de données au sein du NAN peut être modélisé en trois catégories en fonction du schéma de communication utilisé. Le trafic MP2P est le premier modèle à être pris en charge. Cette catégorie couvre le flux de données envoyé par divers types de dispositifs intelligents, y compris les CIs et les appareils de mesures et de contrôle déployés tout au long du réseau de distribution vers les collecteurs de données, y compris les DAPs et les passerelles du FAN. Comme présenté dans la figure 40, la majorité du trafic de cette catégorie est de type *données*, ça peut être des mesures périodiques ou encore des réponses à des commandes du centre de contrôle. Les mesures périodiques présentent un flux de données fixe et planifié par intervalles horaires. En effet, les CIs, les appareils de contrôle et les capteurs collectent des mesures et des informations sur l'état du réseau et les envoient périodiquement au centre de contrôle et de gestion à travers le DAP ou les passerelles du FAN. Les intervalles de mesures

périodiques varient en fonction de l'application correspondante de quelques secondes pour SCADA jusqu'à plusieurs minutes, typiquement 15 min pour les compteurs [114]. Cependant, l'intervalle entre les mesures successives peut être réduit en raison de certaines conditions critiques. Par exemple, un déséquilibre critique entre la demande et la réponse dans une zone spécifique peut réduire l'intervalle de mesure pour les CIs dans cette zone, jusqu'à 1 min, ce qui augmente considérablement le trafic [114]. Les mesures périodiques de grandeurs électriques recueillies par les compteurs sont utilisées pour soutenir un grand nombre d'activités de services publics et des fonctions commerciales telles que la surveillance périodique de la consommation d'énergie, tension, puissance, distribution de l'information sur les prix, et d'autres fonctions de consommation centrée en plus de facturer les clients. Un autre type de trafic de données dans cette catégorie, dit *Event driven traffic*, est déclenché par des événements spécifiques comme les messages asynchrones pour les rapports d'événements, ces paquets sont généralement de taille réduite et moins fréquents par rapport aux messages périodiques, mais ils peuvent générer une surcharge considérable du réseau dans des conditions anormales, comme une condition d'erreur à un nœud qui pousse les autres nœuds à diffuser les paquets spécifiques à l'événement.

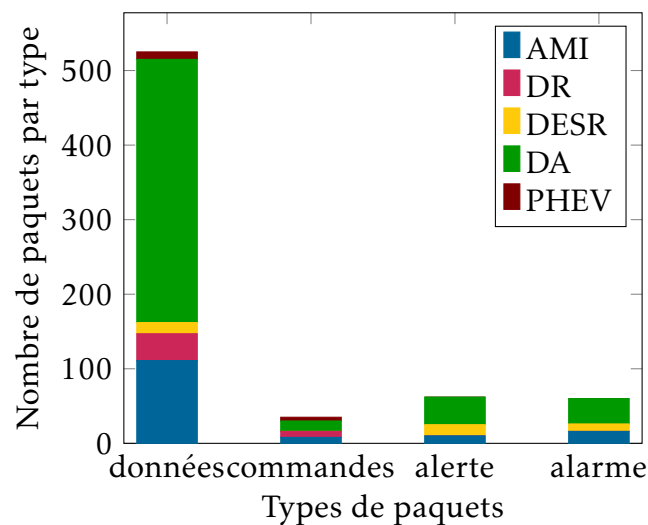


FIGURE 40 – trafic MP2P

P2MP est un autre modèle de communication important pour les NANs. La figure 41 montre que la majorité de ce trafic est de type commande. Ces données, y compris les informations relatives à la tarification en temps réel, les commandes pour l'isolement de défaillance ou pour la re-direction du flux d'énergie, des instructions pour les fonctionnalités demande-réponse, *etc.*..., sont transportées des centres de contrôle aux appareils du réseau de distribution (compteurs intel-

ligents, capacitor bank condensateurs, régulateurs de tension, transformateurs , etc.) pour optimiser la consommation d'énergie de l'utilisateur, lisser les pics de consommation d'énergie, l'optimisation de réseau de distribution et résoudre les diverses défaillances au niveau de la distribution.

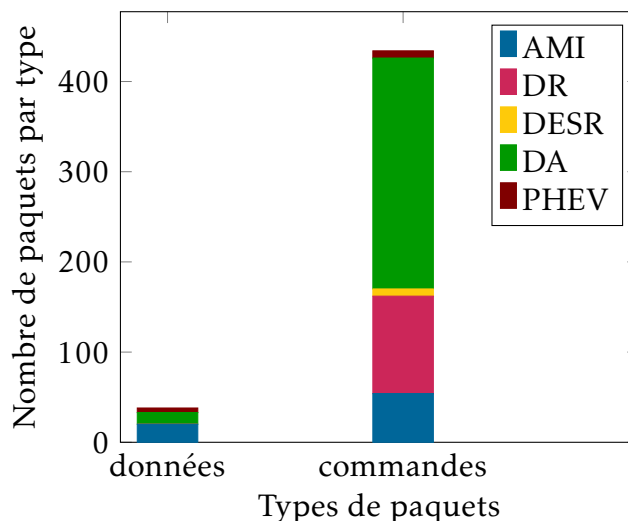


FIGURE 41 – Trafic P2MP

Enfin, la troisième catégorie couvre les communications P2P entre deux appareils. Elle pourrait être exploitée pour répondre aux contraintes de sécurité, d'évolutivité et aux exigences difficiles en temps réel dans les petits segments locaux du réseau de communication du SG. Comme présenté dans la figure 42, la base de données publiée en [1] ne spécifie que le trafic P2P pour l'application DA bien que le volume des données reste non négligeable. Cependant, ce schéma de communication gagne beaucoup d'intérêt en particulier pour les applications de contrôle distribuées. Ainsi, Il est prévu que le volume du trafic P2P s'accroisse rapidement avec l'apparition d'applications plus avancées telles que les *microgrids*, l'intégration massives des DERs et les electric vehicles (EVs). Les dispositifs existants seront améliorés et d'autres seront installés, chacun d'entre eux tendant à injecter une plus grande quantité de données dans le réseau. Le NAN devrait donc être en mesure de soutenir cette évolution.

Niveaux de Priorité du trafic

En se basant sur cette étude, nous proposons cinq niveaux de priorité pour le trafic du NAN. Cette affectation de priorités représente des scénarios dans lesquels les paquets en file d'attente au routeur doivent lutter pour la transmission. Nous décrivons ces niveaux de priorité du plus prioritaire au moins prioritaire :

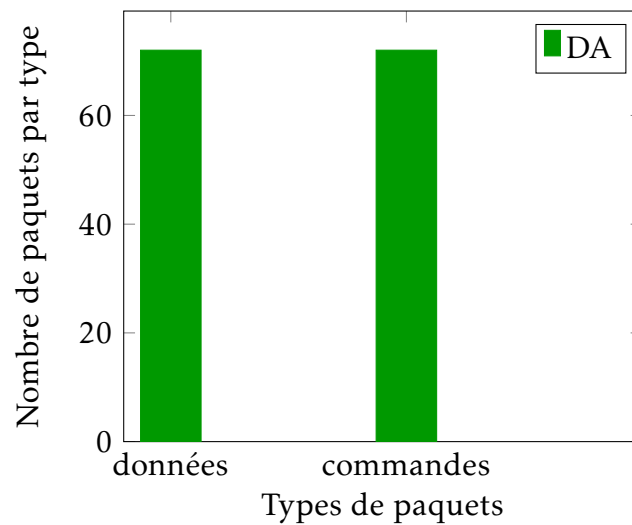


FIGURE 42 – Trafic P2P

1. trafic de haute priorité : ce niveau concerne surtout la protection de l'infrastructure. Les données échangées sont les alarmes de coupures d'électricité et des pannes critiques, y compris les alarmes de défaillance des fonctionnalités du DA (quand par exemple un dispositif échoue à accomplir certaine tâche, ou détecte un dépassement d'un seuil prédéfini), les alarmes de défaillance dans les services de PSD et les alarmes de sécurité. Ces événements pourraient produire un dysfonctionnement dangereux dans le réseau de distribution causant, potentiellement des conséquences graves, surtout dans le cas de cascade de plusieurs anomalies.
2. trafic de conditions critiques : ce sont les données échangées pendant le fonctionnement du réseau dans les conditions anormales, y compris les trafics d'isolation de panne et de restauration du réseau après une défaillance, et aussi les mesures et données nécessaires pour certains traitements de conditions critiques.
3. trafic de haute priorité de fonctionnement normal : ce niveau couvre surtout les alertes et notifications en cas de changement de l'état de certains dispositifs, ou de fonctionnement en dehors de des limites normales.
4. trafic du fonctionnement normal : comme les mesures périodiques, les paquets échangés pour accomplir certains services ou traitement de fonctionnement normal comme une demande de mesure, une commande de commutateur de service. interrogation.
5. trafic du *Background* comprenant les mises à jour des microgiciels (firmware) et les configurations des dispositifs du réseau.

Exigences en termes des délais de transmission des données

Les exigences de délais de transmission de données dépendent de la nature des données à acheminer ; les données qui influencent directement le fonctionnement du système, comme les données de commande et de contrôle, doivent avoir des délais extrêmement faibles, tandis que, pour d'autres types de données, telles que les informations de facturation des clients, des valeurs plus élevées de délais sont acceptables. En effet, certaines opérations exigent que des mesures ponctuelles soient prises pour contrôler les éléments de la grille en cas de défaillance, panne ou tout autre comportement anormal détecté. Par conséquence, les performances du réseau dépendent du respect des exigences de ces applications et services, en particulier le temps écoulé pour transporter des informations de surveillance du réseau (mesures et état), ainsi que des signaux de commande du réseau électrique.

Les exigences en termes de délais de réception des données sur les réseaux de communications diffèrent largement. Par exemple, pour les applications de télé-protection, au niveau du réseau de transmission, le temps écoulé entre le moment où un problème sur une ligne de transmission est détecté et le disjoncteur (circuit breaker) est déclenché ne peut pas être de plus de quelques dizaines de millisecondes (8 millisecondes selon [114]). De même pour l'application WASA, les mesures des synchrophaseurs (PMU) doivent être transportées au centre de contrôle du WAN en quelques millisecondes (16 millisecondes selon [115][116]). Au niveau du NAN, les délais de transmission des mesures et les signaux de commande sont plus tolérables. Les mesures de protection et de surveillance du réseau de distribution nécessitent d'être livrées dans des délais de l'ordre de quelques dizaines, voire centaines de millisecondes, alors que les mesures de compteurs de consommation peuvent tolérer des retards de plusieurs secondes, voire des heures dans certains cas. Chaque application a ses propres exigences sur le temps écoulé à partir du moment où événement se produit à moment où il est traité.

La plage des valeurs des délais exigées par les applications du NAN est très vaste. Pour les événements critiques de très haute priorité, les avis sur le délai exigé diffèrent, néanmoins, toutes les valeurs citées sont de l'ordre de quelques dizaines de millisecondes (20ms [114][68][72]), alors que les délais de transmission des données de configuration et mises à jour des microgiciels peuvent être tolérés jusqu'à des heures, voire des jours [1].

Plusieurs recherches ont été effectuées pour déterminer les délais nécessaires pour l'envoi des données pour chaque application. Certaines études ont spécifié les exigences en délais minimaux [115][114][68][72], d'autres ont opté pour définir le maximum de délais acceptables[1]. Cependant, les exigences en terme de délais réelles dépendent des besoins du fournisseur d'électricité.

Pour les applications de l'AMI, les délais exigés varient de 250 ms pour les données critiques à 1s pour les mesures périodiques [114]. Les experts de U.S DOE estiment que les délais des données des AMI sont entre 2 et 15 secondes [72]. D'autres estiment que ces mêmes délais peuvent être tolérés jusqu'à quelques minutes voire des heures [1].

Pour la gestion active de la demande, les exigences en matière de communication des services peuvent varier en fonction de la sophistication du système désiré par les fournisseurs de service ; du simple avec des exigences plus tolérables, comme le contrôle direct de charge en envoyant simplement une commande d'arrêt à un appareil (un climatiseur ou le chauffage de l'eau chaude), aux applications plus avancées aux exigences plus critiques, comme les services qui permettent aux équipements de répondre à des conditions dynamiques sur la grille, le déplacement de la consommation de charge en temps quasi réel en réponse à des signaux de tarification dynamique, l'utilisation de l'électricité fournie par des ressources de production distribuée situées dans le voisinage. Les valeurs délais exigées par les applications DR varient de 500 millisecondes à 15 secondes [72] [114] [1].

La production d'électricité renouvelable est variable par nature et susceptible d'être encore plus imprévisible lorsqu'elle est utilisée sur une petite échelle. Pour ces raisons, les échanges des mesures et des signaux de commandes en temps quasi-réel seront nécessaires afin de garantir une intégration uniforme dans le réseau. En effet, en fournissant les informations sur la production d'électricité instantanée sur les installations du réseau de distribution, les fournisseurs d'électricité seront capables d'allouer efficacement cette énergie. Les estimations des délais exigés pour les applications DERS varient de 300 millisecondes à 2 seconde [72], alors que dans les conditions critiques le délai diminue à l'ordre des dizaines de millisecondes [72].

Pour les applications des véhicules électriques, les estimations des délais varient entre 2s et 5 minutes [72].

Les applications de DA permettront l'un des services les plus critiques du réseau : la détection des défaillances, l'isolement des fautes et la restauration. Recevoir des notifications et alertes des mesures et des comportements anormaux permet aux fournisseurs de services d'anticiper et prévenir, le plus possible, les pannes potentielles. Dans le pire des cas, en cas de défaillances, la détection et la communication rapides et précises permettront de réduire la fréquence et la durée des pannes. Les fournisseurs de services sont ainsi capables d'agir rapidement pour isoler les pannes, de sorte à limiter son impact, la réparer et déclencher la restauration automatique pour fournir de l'énergie à travers un autre circuit si besoin. D'autres services de DA sont plus tolérants à des délais plus longs, comme les simples données de mesures utilisées pour améliorer le

contrôle des condensateurs et les régulateurs des tension, ce qui contribue à maintenir la tension du circuit et réduit le gaspillage d'énergie. Pour résumer, les délais exigés par les applications de DA ne doivent pas dépasser 1 seconde selon DoE [72]. Dans [114], les estimations des délais minimums sont comme suit : 100 millisecondes pour les événements critiques, 200 millisecondes pour les messages de commandes critiques, 500 millisecondes pour les messages des opérations non critiques. Les experts de *Open SG Network Task Force* estiment les délais maximums à 3s [1].

En règle générale, le trafic avec des exigences de délais inférieures est de niveau de priorité plus élevé, et vice-versa.

Pour résumer, nous présentons les délais maximums autorisés dans le graphe 43 pour mettre en évidence la grande différence entre ces délais. Ce graphe montre aussi la différence dans les estimations des tailles des paquets. Les cercles illustrés en bleu présentent le nombre de paquets ayant les mêmes exigences de délais et la même taille, ainsi la taille de chaque cercle est proportionnelle au nombre des paquets. Comme le montre la figure 43, nous avons des délais de l'ordre de la seconde, minute, heure et même jour. Nous pouvons remarquer 6 groupes principaux : les paquets exigeant des délais maximums de l'ordre de la seconde, sont tous de petite taille ($24 \text{ octets} < \text{taille} < 240 \text{ octets}$). Pour les paquets exigeant des délais maximums de l'ordre de quelques minutes, on peut clairement distinguer deux groupes, ceux de petites tailles ($24 \text{ octets} < \text{taille} < 240 \text{ octets}$) et ceux de grandes tailles ($> 50 \text{ Koctets}$). De même pour les paquets exigeant des délais maximums de l'ordre de quelques heures, nous pouvons distinguer deux groupes selon la taille. Pour les paquets exigeant des délais maximums de l'ordre du jour, tous les paquets sont de grandes tailles. En effet, tous les paquets de grandes tailles sont des paquets de mises à jour des microgiciels, le délai exigé dépend du type de microiciel et des dispositifs concernés.

Exigences en termes de fiabilité de transmission des données

La fiabilité du réseau est définie comme la probabilité de la disponibilité d'une connexion réseau entre les extrémités. Elle dépend de nombreux facteurs, y compris le moyen de communication, de l'environnement (comme sous-terrain ou aérien), la météo et l'état physique des composants du réseau. Elle est aussi largement influencée par la fréquence des défaillances des nœuds et des liaisons dans le réseau, ainsi que du temps de réparation.

Vue la nature des données transférées sur les réseaux de communication du SG, la fiabilité du réseau exigée est très élevée. En effet, les experts du U.S. DOE ont estimé les valeurs de fiabilité du réseau entre 99% et 99.999% pour les applications du NAN [72]. Une valeur de 99,999% de fiabilité pour une connexion réseau se traduit par une probabilité d'indisponibilité du réseau de 0,00001 (en

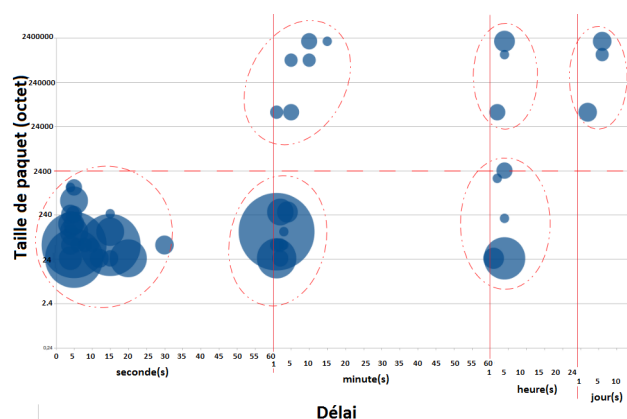


FIGURE 43 – Classification du trafic du NAN en fonction des délais maximums autorisés et ses tailles des paquets.

raison de défaillances dans le réseau) [114]. Souvent, cette indisponibilité est définie comme la durée durant laquelle le réseau ne sera pas disponible sur un an. Ainsi, pour 99,999% de fiabilité, l'indisponibilité ($0,00001 \times 365 \times 24 \times 60$) se trouve à moins de 5,3 min par an en moyenne [114]. Toutefois, la spécification de la fiabilité étant une probabilité, une telle interprétation informelle ne signifie pas une période définitive de l'indisponibilité en un an. La fiabilité du réseau peut être améliorée en utilisant de multiples chemins physiques, soit des liaisons parallèles et séparées entre les éléments de réseaux adjacents ou deux ou plusieurs chemins entre deux points d'extrémité, chacun allant sur un ensemble distinct d'éléments de réseaux intermédiaires.

La fiabilité de transmission de données est la probabilité que les données sont délivrées sans échec sur une période donnée. Les experts du *Open SG Network Task Force* ont estimé la fiabilité de transmission de données de fonctionnement normal supérieure à 98% (supérieure à 90% pour certains services comme la lecture des compteurs), et supérieure à 99% pour les notifications d'erreurs, alertes, alarmes et certains données en réponse aux commandes ou traitements spécifiques [1].

En gros, au niveau du routage des données, la fiabilité de transmission des données dans le réseau NAN peut être améliorée en utilisant trois concepts : le routage multi-chemins offrant plusieurs chemins entre deux points d'extrémité, le routage des données utilisant des mécanismes de récupération rapide et efficace en cas de rupture des liens, et le routage tenant compte de la fiabilité des liens en acheminant les paquets.

QoS-GRACO

Afin d'adapter le processus de routage au cas particulier des réseaux NAN, nous proposons un nouveau protocole de routage qui prend en compte les exigences en QoS dans le processus d'acheminement des données. Le protocole proposé est un routage basé sur la différenciation. Il s'agit de catégoriser le trafic de données en différentes classes en fonction de leurs exigences en QoS et de router les données en fonction de la catégorie de trafic à laquelle elles appartiennent.

En plus de la classification basée sur la qualité de service, un traitement de priorité aussi est effectué si nécessaire. Si deux paquets de la même classe arrivent à un nœud, celui avec la plus haute priorité est envoyé en premier. Le niveau de priorité dépend de la nature des données comme décrit dans la section II.

Le protocole de routage proposé, appelé QoS-GRACO, pour *QoS aware geographic greedy forwarding with ACO based recovery*, est un protocole de routage géographique multi-chemins en fonction des QoS. Ce protocole est basé sur le principe de routage de GRACO décrit dans le chapitre I. Il utilise deux modes d'acheminement : un mode glouton modifié et un mode de récupération. Le fonctionnement global de QoS-GRACO est présenté dans la figure 44. Tout nœud recevant un paquet à acheminer, tente tout d'abord de le faire progresser en mode glouton et en utilisant des traces de phéromones si elles existent vers sa destination. Si c'est le cas, cela veut dire que une récupération a été déjà déclenchée pour chercher une route vers la même destination. Le fait d'utiliser ces traces de phéromones permet d'éviter tout un traitement qui peut mener vers une même impasse qui a déclenché cette ancienne récupération. Dans le cas contraire, où le nœud ne trouve pas des traces de phéromones vers la destination demandée, il essaie d'acheminer le paquet en utilisant le premier mode glouton, si cela n'est pas possible il déclenche le deuxième mode : le mode de récupération. Nous détaillons les modes d'acheminement dans le reste de cette section.

Modèle de QoS

Les QoS sont généralement définies comme un ensemble d'exigences de service qui doit être pris en charge par le réseau tout en transportant les paquets sur le réseau. Les métriques de QoS peuvent être classifiées comme des métriques additives, concaves et multiplicatives. Soit $m(u, v)$ une métrique de performance caractérisant un trajet (u, v) connectant le nœud u au nœud v . $(u, u_1, u_2, \dots, u_k, v)$ est l'ensemble des nœuds appartenant au trajet (u, v) . La métrique m est dite :

- additive si $m(u, v) = m(u, u_1) + m(u_1, u_2) + \dots + m(u_k, v)$. Le délai de bout-en-bout est un exemple de métrique additive.

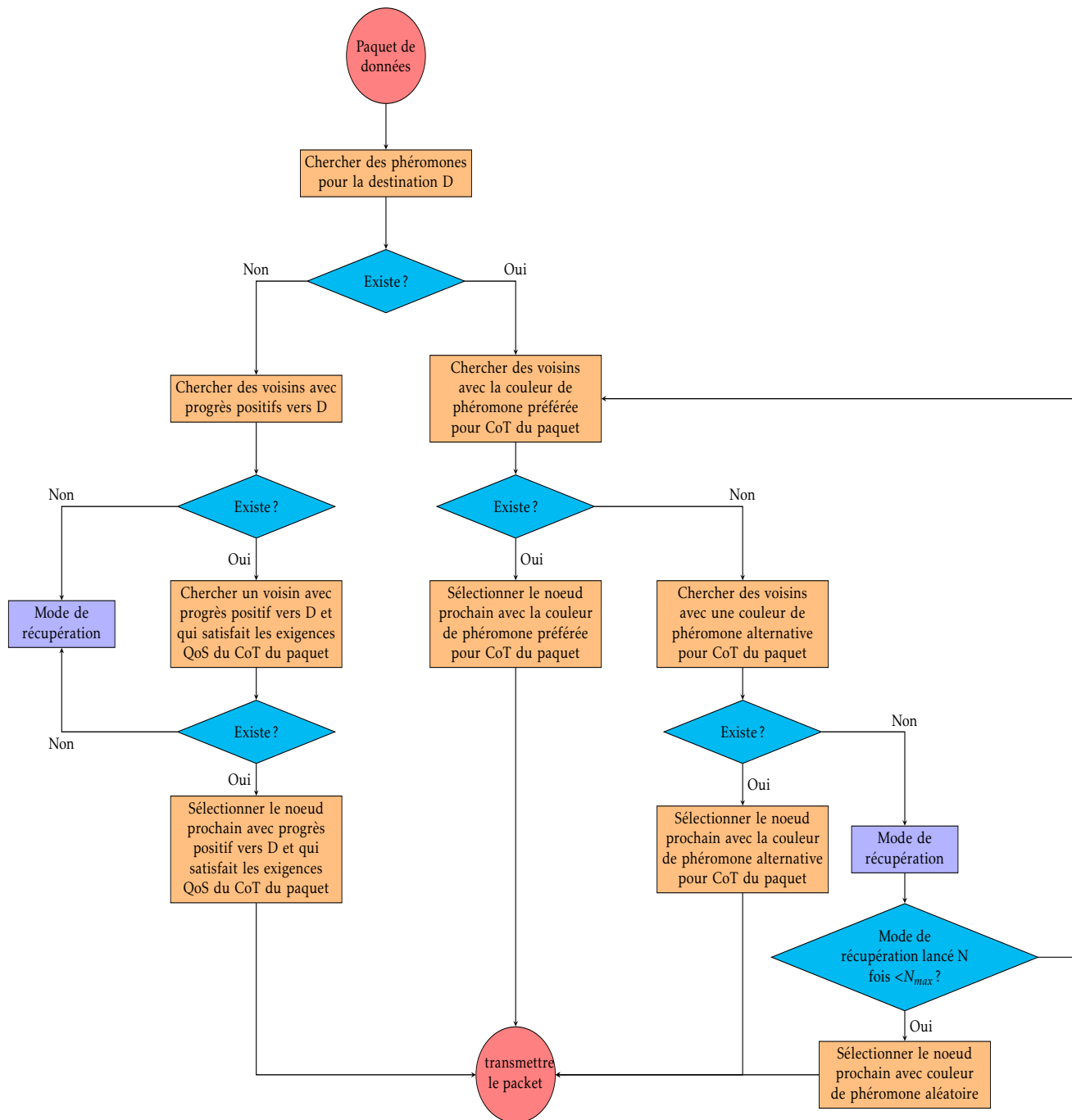


FIGURE 44 – QoS-GRACO

Classe	Description	Délai	Fiabilité
CoT1	Trafic de haute priorité	$D < 30ms$	$R > 99\%$
CoT2	Trafic de fonctionnement critique	$D < 50ms$	$R > 98\%$
CoT3	Trafic de prioritaire du fonctionnement normal	$D < 200ms$	$R > 95\%$
CoT4	Trafic du fonctionnement normal	$D < 1s$	$R > 90\%$

TABLEAU 7 – Les classes de trafic

- concave si $m(u, v) = \min\{m(u, u_1), m(u_1, u_2), \dots, m(u_k, v)\}$. La fiabilité et la bande passante sont des métriques concaves.
- multiplicative si $m(u, v) = m(u, u_1) \times m(u_1, u_2) \times \dots \times m(u_k, v)$. La probabilité de perte est une métrique multiplicative.

Dans ce travail, nous considérons les métriques de délai de bout-en-bout et de fiabilité. En utilisant seulement les informations locales, chaque nœud est capable de calculer la qualité de ses liens vers ses voisins en termes de délai et fiabilité comme suit :

- le délai d'un lien \overrightarrow{AB} : est l'intervalle de temps entre l'instant où le nœud A envoie le paquet et l'instant où le nœud B le reçoit, y compris le délai de canal de la liaison, le délai de propagation radio, le délai de mise en attente et le délai de traitement de protocole,
- fiabilité d'un lien \overrightarrow{AB} : est le taux de paquets transmis en succès sur le lien.

Pour un chemin $P = A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F$ du nœud A au nœud F, le délai de bout-en-bout et la fiabilité de P sont définis comme suit :

- $\text{délai}(P) = \text{délai}(\overrightarrow{AB}) + \text{délai}(\overrightarrow{BC}) + \text{délai}(\overrightarrow{CD}) + \text{délai}(\overrightarrow{DE}) + \text{délai}(\overrightarrow{EF})$
- $\text{fiabilité}(P) = \min\{\text{fiabilité}(\overrightarrow{AB}), \text{fiabilité}(\overrightarrow{BC}), \dots, \text{fiabilité}(\overrightarrow{EF})\}$

En se basant sur l'analyse de trafic du NAN effectuée dans la section II, nous proposons de classer le trafic de données du NAN en quatre catégories appelées classes de trafic. Chaque classe est caractérisée par des exigences QoS, en termes de délais de bout-en-bout et fiabilité comme présenté dans le tableau 7. Nous avons choisi d'utiliser les estimations de délai minimal dans notre classification, pour maximiser la marge de sureté. Dans le cas où un paquet a dépassé légèrement l'estimation du délais minimal, on est toujours au dessous du délai maximal autorisé.

Mode glouton : QoS aware ph-assisted greedy forwarding

L'approche gloutonne du protocole QoS-GRACO est inspirée de celle utilisée dans le protocole GRACO, c'est une phase *ph-assisted greedy forwarding*, mais avec une modification du critère de sélection du prochain nœud pour prendre en compte les QoS exigées. Le processus de sélection de *QoS-aware greedy routing* consiste à choisir le prochain nœud parmi les voisins de la zone de progrès positif, qui satisfait, localement, les QoS de classe de trafic (CoT) du paquet.

Nous expliquons le principe du *QoS-aware greedy routing* à travers des exemples présentés dans les figures 45, 46 et 47. Dans ces figures, nous utilisons des couleurs différentes pour marquer les chemins (ainsi que les nœuds appartenant à ces chemins) qui satisfont les exigences de chaque classe de trafic. La couleur rouge correspond à la catégorie CoT1, la bleue au CoT2, la verte au CoT3 et enfin la noire au CoT4.

La figure 45 présente un scénario d'acheminement d'un paquet de classe CoT3 en utilisant le mode glouton de QoS-GRACO. Les voisins permettant un progrès depuis le nœud courant sont colorés avec la couleur du CoT qu'ils satisfont. N_1 , N_2 et N_5 (marqués en vert) répondent aux exigences de la classe CoT3, alors que N_3 et N_4 (marqués en noir en correspondance à la CoT4) fournissent des QoS moins restreintes. Dans ce premier scénario, un paquet de classe CoT3 arrive au nœud courant S. S commence par chercher s'il y a des pistes de phéromones (préférée ou alternative) satisfaisant les exigences de la classe du paquet. En ne trouvant aucune trace de phéromones, S tente de faire progresser le paquet en utilisant *QoS-aware greedy forwarding* ; le nœud sélectionne alors, parmi ses voisins de la zone de progrès vers D, celui qui répond aux exigences du paquet, s'il en trouve plusieurs, comme c'est le cas dans cet exemple N_1 , N_2 et N_5 , S sélectionne N_2 qui fournit le progrès maximal vers D parmi ces nœuds. Le paquet sera donc transmis à N_2 . Le même traitement est déclenché dans tout nœud recevant le paquet jusqu'à arriver à la destination.

Dans le deuxième scénario, présenté dans la figure 46, un paquet de classe CoT2 arrive à S. S déclenche le processus d'acheminement, il ne trouve pas de pistes de phéromones ni de voisins à progrès positif satisfaisant les exigences du paquet. Le paquet est considéré comme étant dans un vide, ce n'est pas un vide physique, c'est un vide de QoS. Par conséquent, S déclenche un mode de récupération, plusieurs routes de qualités différentes (donc de couleurs différentes) ont été découvertes. Parmi ces routes, S choisit la couleur préférée du paquet pour l'acheminer, la route marquée en bleu. Dans le cas où la couleur préférée n'existe pas, le nœud choisit alors une route avec une des couleurs alternatives du CoT du paquet. On parle d'une route de couleur alternative quand elle répond aux exigences d'une autre classe de trafic plus restreinte. Cette route peut alors satisfaire des exigences moins restreintes, mais les paquets appartenant à la

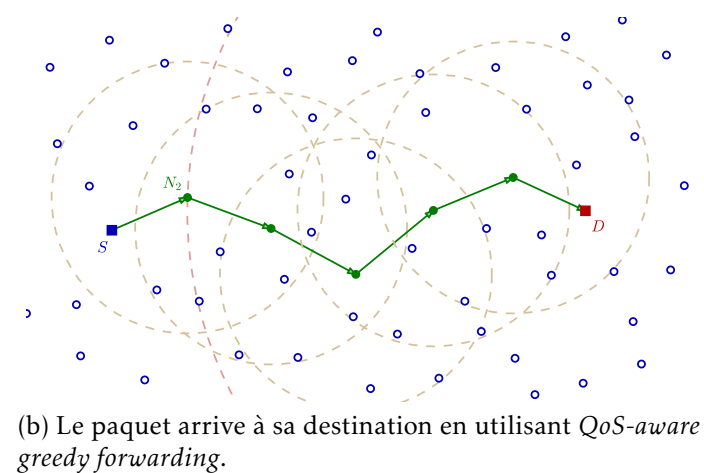
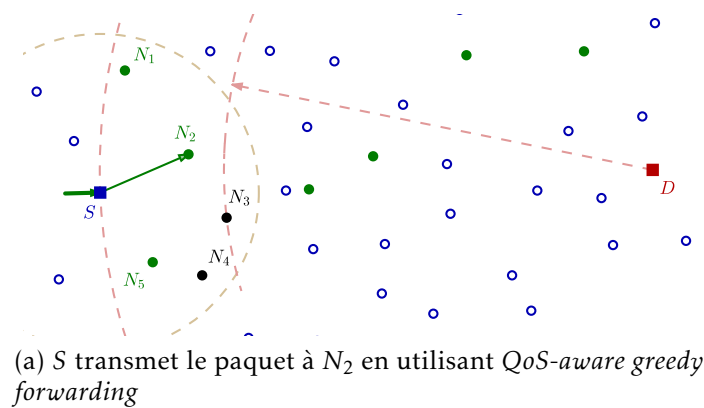


FIGURE 45 – Scénario1 : routage d'un paquet de CoT_3 en utilisant QoS-GRACO.

classe correspondante sont prioritaires pour l'utiliser.

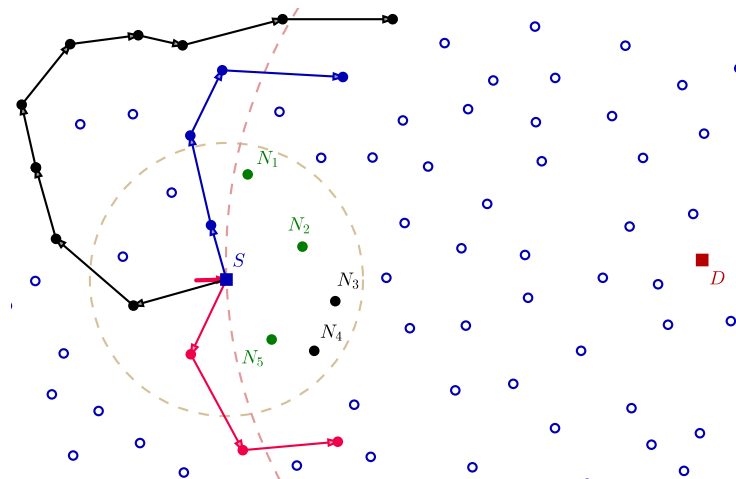
Dans le troisième scénario, présenté dans la figure 47, un paquet de classe CoT1 arrive à S. En déclenchant le processus de routage, le nœud trouve des traces de phéromones, cela signifie que le mode glouton a précédemment échoué, un mode de récupération a donc été lancé et des traces de phéromones ont été déposées en réponse pour marquer les routes trouvées. Pour cette raison, le nœud courant utilise la route avec la couleur préférée parmi les pistes existantes si elle existe, dans ce cas la route marquée en rouge, sinon celle avec une couleur alternative.

Mode de récupération : QoS aware ACO based recovery

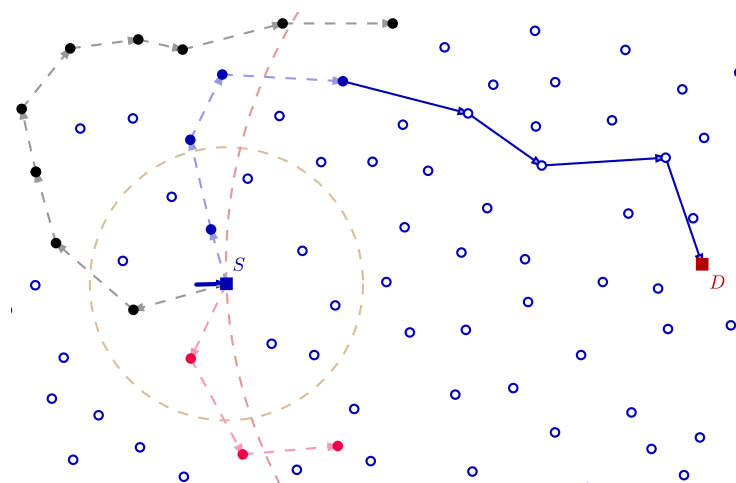
Comme dans GRACO, le processus de récupération de QoS-GRACO prend le relais dès que la première phase n'est plus possible, ceci arrive dans les cas de vides physiques ou encore de vides de QoS. On parle de vide de QoS lorsque la zone du progrès positif du nœud courant n'est pas vide, mais aucun voisin de cette zone ne répond aux exigences QoS demandées.

QoS-GRACO utilise le même concept d'établissement de route, de gestion de cascade de processus de récupération ainsi que la gestion de boucle du protocole GRACO décrit dans le chapitre I, en utilisant le concept de zone, les *Fants* et les *Bants*. Mais pour tenir compte des exigences des classes de trafic décrites dans le paragraphe II, nous adoptons la notion de couleur au concept de phéromones, ainsi les phéromones déposées par les fourmis deviennent colorées en fonction des qualités des routes trouvées. Les fourmis éclaireuses *Fant* calculent la qualité de la route qu'elles sont en train d'explorer. Selon la qualité de la route annoncée par les *Fants* correspondantes, les fourmis de retour *Bants* décident la couleur, ainsi que l'intensité de phéromones en fonction de l'aptitude du chemin pour les classes de trafic correspondantes. En retournant au nœud qui a déclenché le mode de récupération, elles marquent les chemins trouvés en déposant des traces de phéromones colorées à chaque nœud le long du chemin. Chaque classe de trafic est associée à une couleur, par exemple, un chemin avec un délai ≤ 30 millisecondes et une fiabilité $\geq 99\%$ est adapté pour le trafic de la classe CoT1 et il sera donc marqué par la phéromone de type (ou couleur) rouge. La figure 48 présente les classes de trafic (CoT1, CoT2, CoT3 et CoT4) et les couleurs correspondantes (rouge, bleu, vert et noir).

Quand le nœud qui a déclenché le processus de récupération reçoit une *Bant*, il tente de faire progresser le paquet de données bloqué en utilisant la route trouvée si la couleur de phéromone correspond à la classe du trafic du paquet. La piste de phéromone correspond à une classe de trafic si elle est colorée par la couleur préférée ou alternative de la classe, comme montre la figure 48. Dans le cas contraire, où la piste marquée ne correspond pas à la classe du trafic du paquet bloqué, le nœud relance le mode de récupération une autre fois. Afin de



(a) S a essayé de transmettre le paquet en utilisant *QoS-aware greedy forwarding*. S ne trouve aucun voisin permettant un progrès vers la destination et qui satisfait les QoS de la classe CoT_2 . S lance le mode de récupération.



(b) Le paquet est transmis en utilisant les pistes de phéromones puis le *QoS-aware greedy forwarding* jusqu'à arriver sa destination

FIGURE 46 – Scénario 2 : routage d'un paquet de CoT_2 en utilisant QoS-GRACO

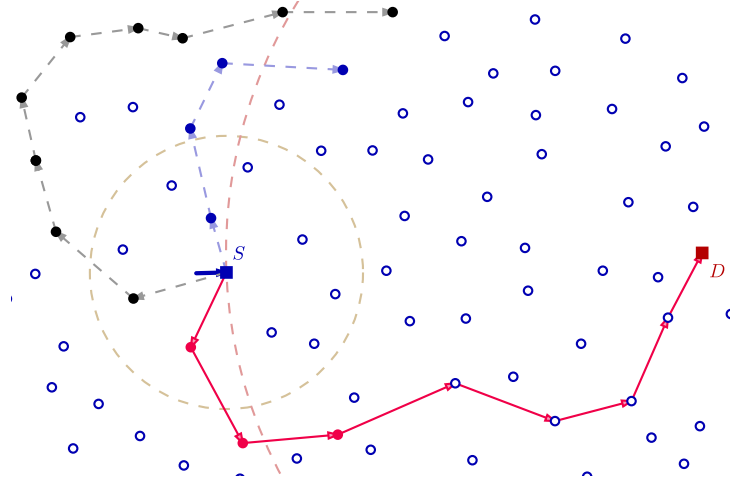


FIGURE 47 – Scénario 3 : routage d'un paquet de CoT_1 en utilisant QoS-GRACO. Le paquet est transmis en utilisant les pistes de phéromones puis le *QoS-aware greedy forwarding* jusqu'à arriver sa destination.

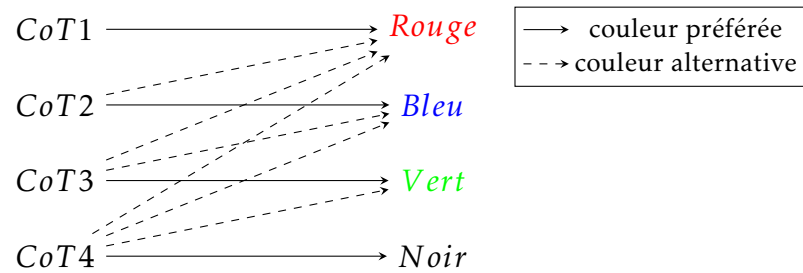


FIGURE 48 – Mapping des classes de trafic aux couleurs de phéromones préférées et alternatives.

ne pas inonder le réseau de paquets *Fants* et *Bants*, ce qui engendrerait des délais supplémentaires et affecterait la fiabilité des liens, nous limitons le nombre de relances du processus de récupération par un nombre maximal N_{max} . Si aucun processus de récupération lancé n'a abouti à un chemin convenable, le nœud tente quand même de transmettre le paquet bloqué en utilisant les phéromones disponibles. Le processus de sélection de la piste dans ce cas suppose que les phéromones ne sont pas colorées, on utilise donc le concept de sélection de route de GRACO.

Simulations et résultats

Dans cette section, nous évaluons les performances de l'algorithme QoS-GRACO ainsi que sa pertinence pour les exigences de QoS des réseaux SG NANs. Nous avons simulé le fonctionnement de l'algorithme sur des réseaux connectés avec des topologies aléatoires, et un nombre de nœuds variant de 250 à 900 dans un domaine de $300\text{ m} \times 300\text{ m}$. Les nœuds ont une portée de communication de 25 m . Les topologies contiennent nécessairement des trous de communication de tailles, formes et emplacements aléatoires. Nous sélectionnons dans chaque réseau un ensemble aléatoire de sources et destinations de telle façon qu'ils sont de différents côtés d'un vide pour déclencher le processus de récupération. Pour simuler un trafic de données, dix paquets de données de chaque classe de trafic sont envoyés pour tout couple (source, destination). Nous mesurons le taux de livraison, le nombre de messages de contrôle et le délai de bout-en-bout. Le taux de livraison est le rapport entre le nombre de messages reçus et le nombre de messages envoyés. Les messages de contrôle sont les messages *HELLO* utilisés pour échanger des informations entre les voisins, *Fants* et *Bants* utilisés pour établir un chemin. Enfin, le délai de bout-en-bout comptabilisé comme étant l'intervalle de temps entre l'instant où la source a envoyé le premier paquet de données et l'instant où la destination a reçu le dernier. Les paramètres de simulation sont résumés dans le tableau 8.

Coût de livraison

La figure 49 illustre le coût de la livraison de données variant en fonction du nombre de paquets de données envoyés pour une couche MAC idéale. Au début, plus la classe du trafic est exigeante, plus les paquets de contrôle sont utilisés pour chercher des routes convenables. Mais quand le nombre de paquets envoyés augmente, le cas devient complètement inverse ; ce sont les classes les moins exigeantes qui délivrent les données les plus coûteuses. Pour la classe CoT1, le coût utilisé pour délivrer les paquets est au début le coût le plus élevé

Paramètres	Valeur
Durée (s)	300
Routage	QoS-GRACO
MAC	couche MAC idéale et MAC IEEE 802.15.4 CSMA-CA
Radio	half-duplex
Interférences	aucune
Modulation	bpsk
Taille du domaine	300 m×300 m
Portée de communication	25m
Nombre de nœuds	250, 350, 450, 550, 650, 750, 850, 900

TABLEAU 8 – Paramètres de simulation

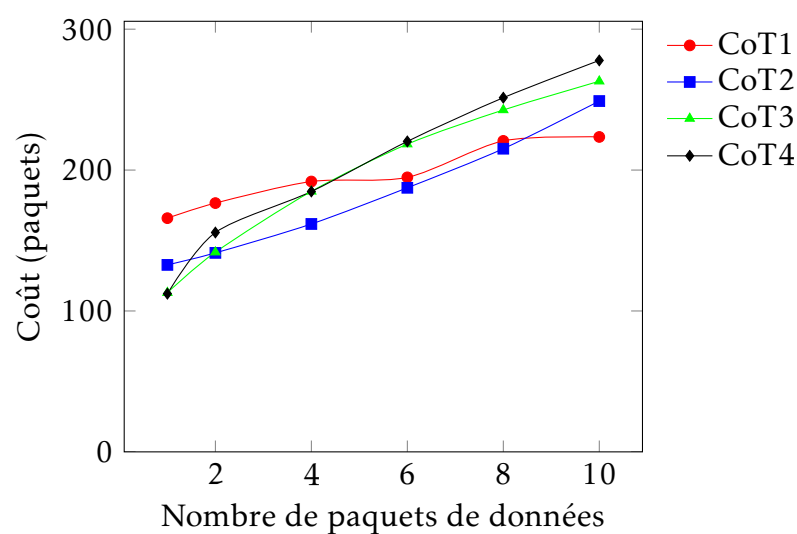


FIGURE 49 – Coût de transmission en fonction du nombre de paquets de données envoyé - couche MAC idéale

parmi toutes les classes, en effet, la classe CoT1 étant la classe la plus exigeante, l'algorithme utilise donc plus de paquets de contrôle pour la recherche d'une route qui répond à ses exigences. Cependant, quand le nombre de paquets envoyés augmente, ce coût devient inférieur à celui des autres classes (à partir du 6^{ème} paquet par rapport au CoT3 et CoT4 et à partir du 8^{ème} paquet par rapport au CoT2), ceci est expliqué par le fait que les routes utilisées pour délivrer les paquets dans le temps le plus bref sont les routes les plus courtes et donc les paquets utilisés pour la transmission de données sont moins nombreux que ceux utilisés sur les longues routes.

En utilisant une couche MAC 802.15.4 (figure 51), nos simulations ont montré

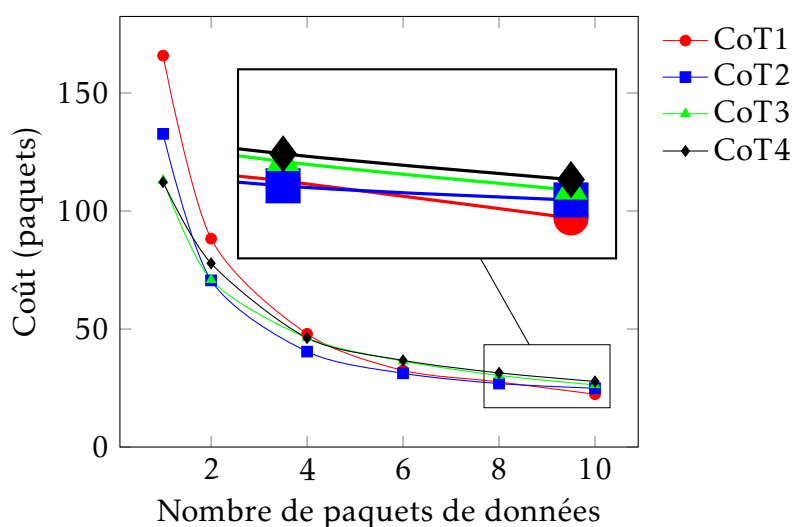


FIGURE 50 – Coût par paquet en fonction du nombre de paquets de données envoyé - couche MAC idéale

que plus la classe du trafic à laquelle appartient les données est exigeante, plus le nombre de paquets de contrôle augmente pour délivrer ces données. En effet, avec une couche MAC réaliste, la qualité des liens est très variable, la première phase de l'algorithme n'aboutit pas toujours au même vide, la phase de récupération est donc lancée plusieurs fois sur la route pour la recherche. Néanmoins, comme présenté sur la figure 52, au fur et à mesure que le nombre de paquets envoyés entre la même source et la même destination augmente, le coût par paquet diminue car l'acheminement est effectué en utilisant les traces de phéromones déposées par les anciennes phases de récupération.

Les figures 50 et 52 présentent les coûts par paquet de chaque classe de trafic avec, respectivement, une couche MAC idéale et une couche MAC réaliste. Dans les deux cas, les simulations montrent que les premiers paquets sont toujours délivrés de façon plus coûteuse que les prochains paquets envoyés entre les

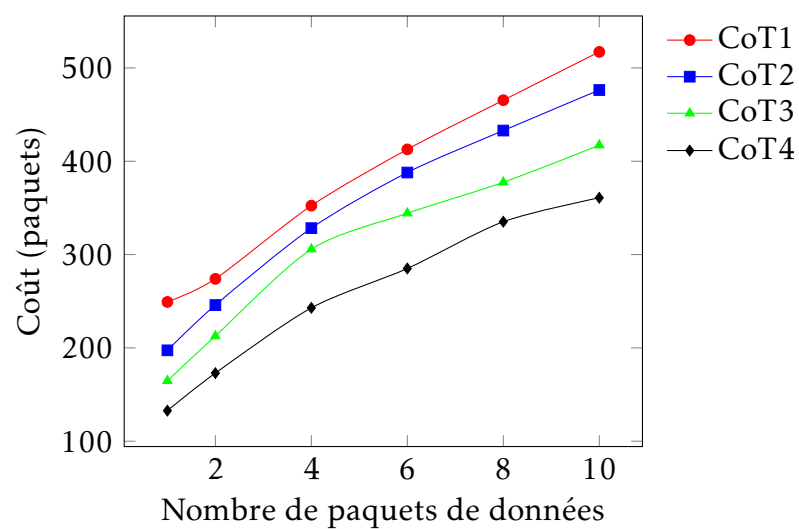


FIGURE 51 – Coût de transmission en fonction du nombre de paquets de données envoyé - 802.15.4 MAC

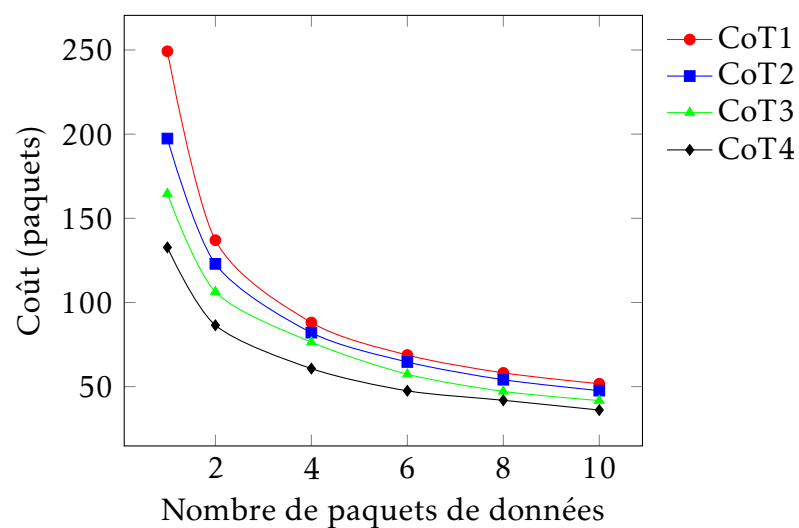


FIGURE 52 – Coût par paquet en fonction du nombre de paquets de données envoyé - 802.15.4 MAC

mêmes sources et les mêmes destinations. En effet, au court du temps, plusieurs pistes de phéromones sont déposées pour marquer des routes déjà trouvées, et sont, par la suite, utilisées pour l'acheminement des prochains paquets de données.

Délai de bout-en-bout

Les figures 53 et 55 présentent le délai de bout-en-bout en fonction du nombre de paquets de données envoyés avec, respectivement, une couche idéale et une couche MAC réaliste IEEE 802.15.4. Ce délai représente l'intervalle de temps entre l'instant où le nœud source envoie le premier paquet de données et celui où la destination reçoit le dernier. En respectant les exigences de délais, QoS-GRACO délivre les paquets de données rapidement en fonction de la classe du trafic. En effet, les paquets de la classe CoT1, classe la plus exigeante, sont transmis plus vite que les paquets appartenant aux autres classes moins exigeantes (CoT2, CoT3 et CoT4). De même pour la classe CoT2, les paquets de cette classe sont livrés plus rapidement que ceux appartenant aux classes CoT3 et CoT4, et ainsi de suite.

En comparant les délais par paquet, les premiers paquets de chaque classe prennent plus de temps pour être livrés, en effet, QoS-GRACO lance la récupération la première fois qu'un paquet est envoyé vers une destination si le paquet arrive à un vide, que ce soit physique ou de QoS, par contre les paquets suivants envoyés vers la même destination utilisent les traces de phéromone déposées pour les chemins trouvés lors de l'ancienne phase de récupération.

Sur la figure 55, les traits représentés en pointillés, sont les limites des délais exigés : le trait en rouge pour la classe CoT1, et le trait en bleu pour la classe CoT2. Les limites des délais exigés pour les classe CoT3 (200ms) et CoT4 (1s) ne sont pas présentés sur les figures car les valeurs sont grandes par rapport à la plage des valeurs de la figure. On remarque que les délais de toutes les classes sont relativement petits, ceci est dû à la possibilité d'utiliser des routes avec des couleurs de phéromone alternatives, surtout pour les classes moins exigeantes, comme la classe CoT4. En effet, les paquets de cette classe peuvent utiliser toutes les couleurs de phéromone, ils peuvent donc arriver à leur destination dans des délais très brefs par rapport à la limite exigée.

Taux de livraison

La figure 57 compare les taux de livraison ainsi que les pourcentages des paquets délivrés avec succès en respectant les exigences de QoS, avec une couche MAC idéale et une couche MAC réaliste. Pour la couche MAC idéale, QoS-GRACO est capable de transmettre tous les paquets de données avec succès et de

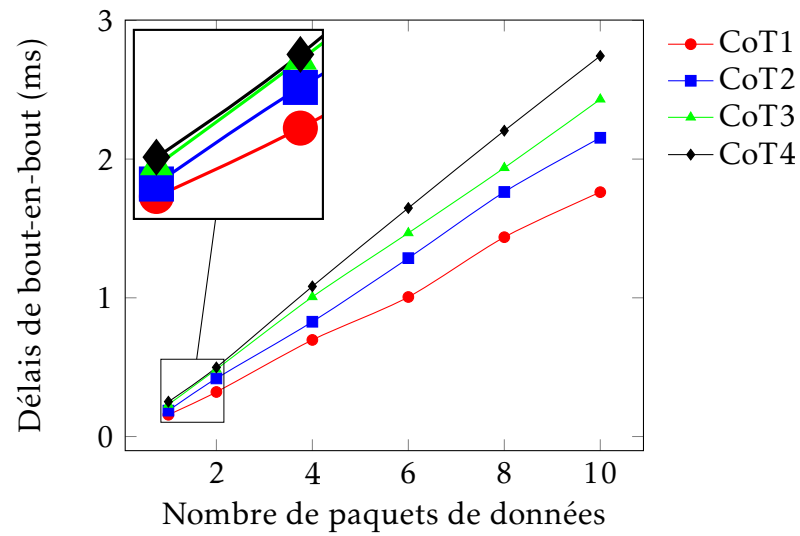


FIGURE 53 – Délai de bout-en-bout en fonction du nombre de paquets de données envoyé - couche MAC idéale

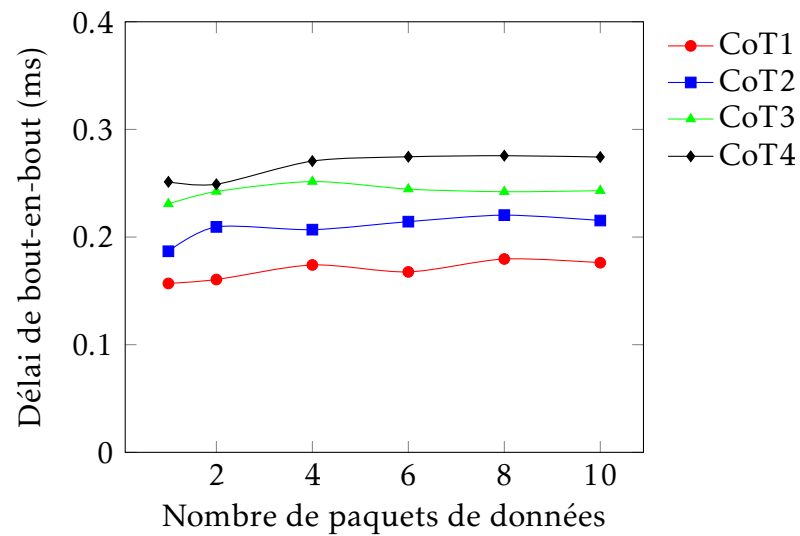


FIGURE 54 – Délais de bout-en-bout par paquet en fonction du nombre de paquets de données envoyés - couche MAC idéale

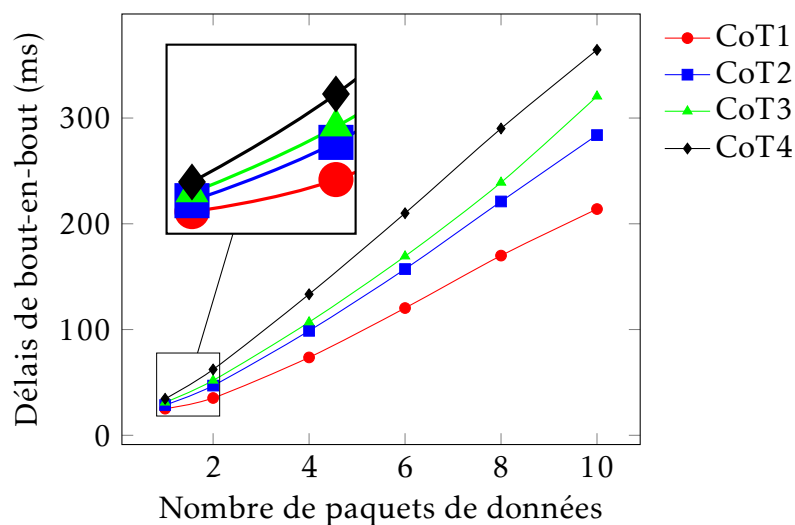


FIGURE 55 – Délais de bout-en-bout en fonction du nombre de paquets de données envoyé - 802.15.4 MAC

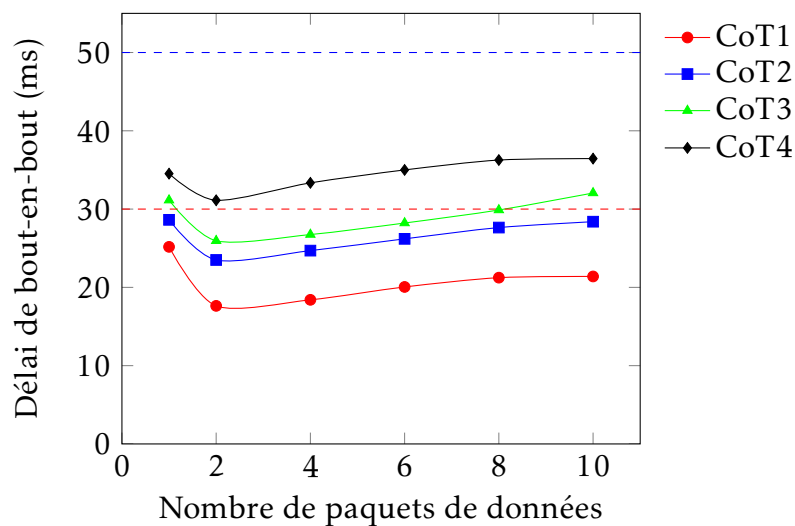


FIGURE 56 – délai de bout-en-bout par paquet en fonction du nombre de paquets de données envoyé - 802.15.4 MAC

plus, avec les QoS respectées. Pour la couche MAC réaliste, le taux de livraison est maintenu proche des 90%. Aussi le nombre de paquets délivrés en respectant les QoS est affecté, 70% des paquets arrivent à leur destination en respectant les délais et les taux de fiabilité exigés. En effet, en utilisant une couche MAC réaliste, l'effet des multiples collisions qui peuvent avoir lieu au niveau de la couche MAC impacte la fiabilité des liens et retarde l'envoi de certains paquets.

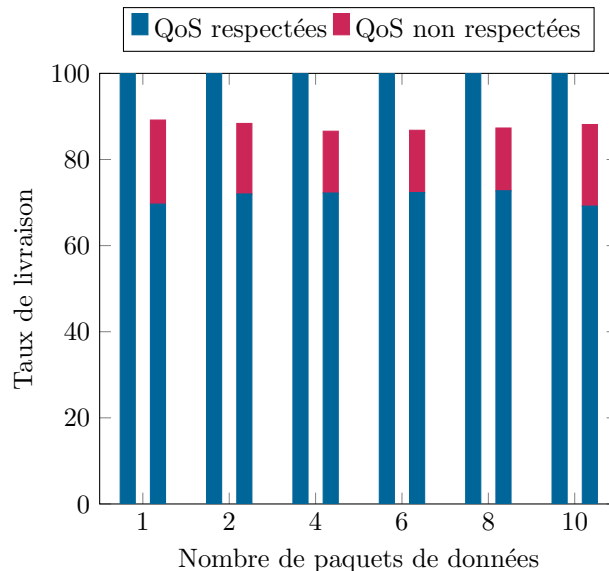


FIGURE 57 – taux de livraison et pourcentage des paquets respectant les QoS exigées - MAC idéale et 802.15.4 MAC

La figure 58 illustre le taux de paquets respectant les QoS parmi les paquets reçus avec succès en fonction des classes de trafic pour une couche MAC réaliste. La figure 58 montre que les classes de trafic moins exigeantes ont un taux plus haut de paquets arrivant à leur destination avec les QoS respectées. Ceci est dû principalement à l'instabilité des liens quand on utilise une couche MAC réaliste. En particulier, il est difficile de maintenir des liens avec haute fiabilité.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé QoS-GRACO, un protocole de routage dérivé de GRACO et qui tient compte des exigences en QoS des données. Comme GRACO, QoS-GRACO est un protocole de routage géographique combinant une phase gloutonne et une phase de récupération. La première phase, *QoS aware ph-assisted greedy forwarding*, permet de progresser les paquets vers la destination en utilisant les positions géographiques, mais aussi d'ajuster ce

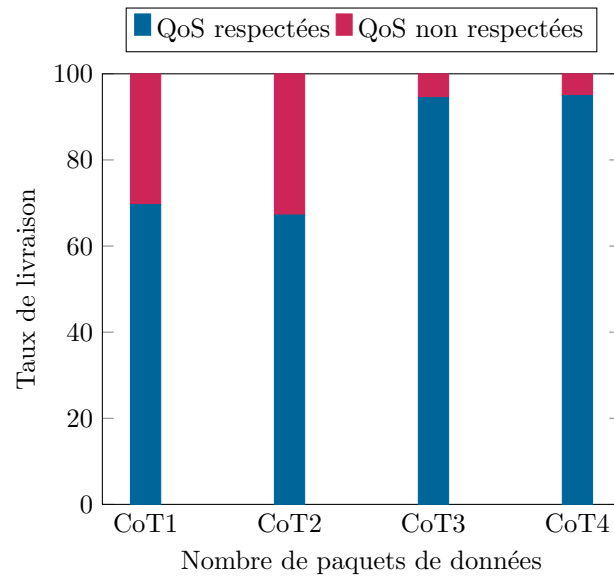


FIGURE 58 – Pourcentage des paquets respectant les QoS exigées par classe de trafic - 802.15.4 MAC

processus en fonction des QoS exigées. Dans le cas où un nœud n'arrive pas à trouver un chemin qui réponde aux exigences d'un paquet en utilisant le *QoS aware ph-assisted greedy forwarding*, l'algorithme déclenche une phase de récupération. Cette deuxième phase est aussi inspirée du mécanisme de récupération basé sur l'ACO et le concept de zones proposé dans GRACO. Mais, afin de tenir compte des exigences de QoS, nous avons proposé le concept de phéromone colorée. Le processus de récupération permet donc de chercher des routes et de les marquer en fonction de leur qualité. La phase de récupération est également lancée quand le mode d'acheminement de la première phase n'est plus possible à cause d'un vide physique.

QoS-GRACO étant un routage géographique, il est local et distribué, il peut donc s'adapter aux changements de topologie du réseau garantissant ainsi l'avantage du passage à l'échelle. De plus, grâce à l'efficacité du processus de récupération, le protocole offre l'aspect auto-guérison, ce qui améliore sa flexibilité et scalabilité. D'ailleurs, les résultats des simulations ont montré que QoS-GRACO est capable de répondre aux exigences les plus restreintes de la communication en termes de délai de bout en bout et fiabilité.

Pour la continuité de ce travail, nous souhaiterions améliorer le modèle QoS ajouté au protocole en tenant compte d'autres QoS. et d'étudier d'autres pistes d'améliorations de l'efficacité du protocole afin d'augmenter le taux de livraison de données en général et le taux de livraison de données en respectant les QoS en

particulier. Il serait aussi intéressant de valider expérimentalement les résultats obtenus de nos résultats . En effet, l'utilisation des plateformes réalistes comme FIT IoT-LAB [117] permettrait de tester le fonctionnement du protocole dans un environnement réaliste.

*

Conclusion et Perspectives

Dans ce dernier chapitre, nous présentons une synthèse des contributions de cette thèse. Nous discutons ainsi leurs avantages et leurs limites tout en ouvrant des perspectives pour des recherches futures.

Conclusion

A travers cette thèse, nous avons proposé des solutions de routage des données pour les réseaux de capteurs sans fil dans le but de l'appliquer dans le contexte des SGs, en particulier au niveau du segment de distribution.

Dans la première partie de la thèse, nous avons étudié le problème de routage des données dans les réseaux de capteurs et d'actionneurs sans fil en général. En effet, les réseaux de capteurs et d'actionneurs sans fil sont largement utilisés dans plusieurs domaines et sont censés transmettre une grande quantité de données. Le processus de routage des données à travers ce type de réseau doit être autant efficace que transparent à ses utilisateurs. Pour cela, nous nous sommes particulièrement concentrés sur le fait de proposer un routage léger en termes de complexité et de nombre de messages de contrôle utilisés, tout en étant applicable dans les réseaux de grande taille et à topologie très dynamique. Cela permet de minimiser l'impact du protocole de routage sur le trafic fonctionnel du réseau. Le routage géographique est très apprécié pour ce type de réseau, pour ses nombreux avantages. Outre sa simplicité, le routage géographique est avantagé par rapport aux autres types de routage par ses caractéristiques : l'absence de mémoire, le fonctionnement distribué et local, le passage à l'échelle, l'absence de boucle. En effet, en contraste avec les paradigmes de routage traditionnels (soit proactifs ou réactifs), il n'a pas besoin ni d'inonder l'ensemble du réseau ni de stocker de grandes tables de routage pour mémoriser les routes explorées. Ces caractéristiques le rendent évolutif et économe en énergie puisque il n'a pas

besoin d'envoyer des messages pour la découverte des routes.

Vus les nombreux avantages, nous avons choisi le routage géographique comme paradigme de base pour notre protocole. Nous avons ainsi proposé un nouveau protocole de routage géographique efficace et capable de s'adapter aux changements brusques de topologie. Le nouveau protocole, GRACO, combine deux modes d'acheminement de données, le premier mode est un mécanisme de routage *greedy* assisté par des traces de phéromones, le deuxième est un mode de récupération utilisant un nouveau mécanisme de routage inspiré des algorithmes à base de ACO tout en profitant des connaissances géographiques locales. En utilisant ces deux modes, le protocole est capable d'ajuster le processus d'acheminement des données en fonction de la topologies; il utilise le premier mode autant que possible, et dès qu'il se trouve dans une situation de blocage, il active le mode de récupération. GRACO est entièrement localisé, distribué et évolutif, il ne nécessite pas de créer ou de maintenir des structures de graphe. Seulement les nœuds appartenant aux chemins de récupération doivent mémoriser les traces de phéromone locales, mais ces traces sont de taille modeste et volatiles, elles s'évaporent au cours du temps.

L'objectif principal de nos travaux a été de proposer une nouvelle approche de routage des données pour les réseaux de capteurs et d'actionneurs sans fils dans le contexte des SGs et plus particulièrement dans le réseau de communication déployé au niveau de réseau de distribution (NAN). Pour ce fait, nous nous sommes focalisés dans la deuxième partie de la thèse sur le contexte du SG. Nous avons étudié les exigences en communication sur ce type de réseau en plusieurs étapes. Dans un premier temps, nous avons analysé les particularités du réseau de voisinage NAN et en se basant sur cette étude, nous avons, ainsi, conclu que le routage géographique est un bon candidat pour ce type réseau. Pour cela, nous avons proposé l'utilisation du GRACO, proposé dans la première partie, dans les réseaux NAN, nous avons défendu notre choix en montrant théoriquement que GRACO répond aux exigences de communication des NANs. Par la suite, en utilisant les paramètres fixés par le NIST, nous avons simulé le fonctionnement de GRACO et ses performances dans un environnement SG. Les simulations ont montré l'adéquation et la pertinence de GRACO pour le problème de routage dans les NANs.

Afin de mieux adapter GRACO au cas particulier des réseaux NAN, nous avons étudié, dans un deuxième temps, les exigences en terme de qualités de service des applications utilisant ce réseau. Nous avons proposé une solution pour router les données tout en respectant leurs QoS demandées. La solution consiste à regrouper le trafic du NAN en classes de données selon leurs exigences en QoS et à les acheminer en utilisant un protocole de routage multi-chemins. Nous

avons proposé QoS-GRACO, un nouveau protocole de routage multi-chemins qui tient compte des QoS. QoS-GRACO est basé sur le protocole GRACO, il fonctionne donc en deux modes d'acheminement; un mode glouton et un mode de récupération. Le premier mode utilise une version modifiée acheminement glouton, en effet, à chaque étape, la sélection du prochain saut consiste à choisir un nœud dans la zone de progrès positif qui répond, localement, aux exigences en QoS de la classe à lequel appartient le paquet. Ce mode est aussi assisté par les traces de phéromones si elles existent. Le mode de récupération de QoS-GRACO introduit le concept de phéromones colorées sur le mécanisme de récupération utilisé dans GRACO, les routes sont colorées en fonction de leurs qualités, et les données sont acheminées sur les routes marquées par les phéromones de couleur préférée ou alternative, si la préférée n'existe pas. Les résultats des simulations obtenus sont très encourageants, mais peuvent être améliorées.

Perspectives

Les thématiques que nous avons abordées dans cette thèse nous ouvrent plusieurs perspectives de recherche dans la continuité des travaux réalisés. Nous structurons ces perspectives dans les points suivants :

- **Amélioration du protocole proposé** : Bien que les performances de QoS-GRACO soient satisfaisantes, de nombreuses améliorations peuvent être apportées pour améliorer son adaptabilité aux réseaux NAN. L'algorithme peut être étendu pour tenir compte de plus de QoSs comme la bande passante. Le modèle de classification du trafic du NAN peut aussi être amélioré en ajoutant d'autres exigences et caractéristiques comme les tailles et la fréquence des paquets de données.
- **Expérimentation** : Durant nos travaux, nous avons évalué les performances des protocoles de routage proposés à travers des simulations en utilisant le simulateur WSNNet. Même si nous avons utilisé des paramètres de simulations réalistes (couche MAC et PHY, modèle de propagation, *etc.*), il serait pertinent de valider les algorithmes de routages par expériences sur des plateformes d'expérimentation. En effet, une implémentation réelle nous permettrait d'évaluer l'apport réel des solutions proposées.

Sur le moyen terme, comme les SGs commencent réellement à occuper la place des réseaux électriques traditionnels, une étude d'intégration du protocole proposé est envisageable. Dans ce cadre, quelques améliorations peuvent être apportées pour une meilleure adaptation au déploiement réel. En effet, aujourd'hui, les réseaux SG NANs reposent dans une grande partie sur l'utilisation

du CPL comme technologie de communication [118][119]. Avant de déployer un réseau de capteurs sans fil, on envisage d'utiliser le CPL, dont le support est déjà déployé. Le protocole proposé à travers cette thèse reste valable et fonctionnerait très bien dans ces cas. Cependant, dans le cas spécifique du CPL, on peut trouver des vides de communication qui sont imposés par la topologie du réseau, *i.e.* lors du déploiement du réseau, les lignes sont mises en place d'une certaine manière que tous les nœuds sont bien connectés, mais en utilisant les positions géographiques, certains nœuds sont déployés autour d'un vide géographique, et ceci peut être fréquent. Si tel est le cas, l'utilisation du routage géographique va certainement déclencher la phase de recouvrement avec les fourmis, alors qu'on connaît préalablement l'existence et les caractéristiques du vide géographique. Dans ce cas particulier, il serait intéressant d'étudier si l'utilisation des coordonnées géométriques liées à la topologie filaire au lieu des coordonnées géographiques permettrait d'optimiser le routage.

Sur le plus long terme, il serait intéressant d'aborder le problème de la sécurité et la confidentialité au niveau de routage dans les réseaux NAN. En effet, le SG se base sur la collecte, la communication et le partage des données liées à la consommation d'énergie. En particulier, les réseaux NAN manipulent des données sensible et/ou confidentielles. Des applications avancées du NAN telles que la tarification dynamique, la facturation, la gestion de la demande, prévision de la demande, et la détection des fraudes ont besoin de la collecte et la transmission en temps réel des mesures à grains fins. Toutefois, ce type de données soulève la question de la sécurité des données et surtout la vie privée pour les clients. En effet, lorsque ces données sont capturées et analysées sur une période de temps, il peut fournir une prévision sur les activités et les habitudes des utilisateurs ce qui viole leur vie privée et les rend réticents à participer à des applications SG. Surtout, parmi les caractéristiques du NAN, les dispositifs du réseau sont déployés dans un environnement extérieur et exposés au public. Ainsi, des problèmes de sécurité et protection des données ainsi que de confidentialité et respect de la vie privée s'imposent. De multiples risques doivent être considérés, notamment le piratage de données personnelles, l'usage frauduleux des moyens de communication, l'attaque sur les infrastructures de contrôle et de gestion du réseau électrique et le risque de perte ou de détournement des données de consommation. Ceci exige l'utilisation des mécanismes permettant d'assurer la sécurité et la confidentialité du trafic de données circulant sur le réseau, notamment au niveau routage des données en exploitant, par exemple, l'agrégation de données et techniques d'anonymisation [120].

En outre, dans cette thèse, nous avons restreint l'application des protocoles de routages proposés aux réseaux de capteurs sans fils avec des nœuds fixes. Or

sur le segment de distribution, des nœuds mobiles existent aussi , il faut tenir compte de la main-d'œuvre humaine qui se déplace sur les sites de transport et de distribution d'électricité pour effectuer des maintenances, les véhicules de maintenance peuvent servir comme des points relais mobiles. Ainsi, le protocole de routage des données sur les réseaux NAN doit tenir en compte de la mobilité des nœuds. Des améliorations concernant la prise en compte des différents aspects de mobilité peuvent être apportées sur les solutions de routage proposées.

Liste des publications

Article journal

1. *Geographic routing protocol for the deployment of virtual power plant within the smart grid*, Mouna Rekik, Zied Chtourou, Nathalie Mitton, Ahmad Atieh, Sustainable Cities and Society, Elsevier, 2016.

Conférences

1. *Geographic GReedy routing with ACO recovery strategy GRACO*, Mouna Rekik, Nathalie Mitton, Zied Chtourou, The international Conference on Ad Hoc Networks and Wireless (AdHocNow'2015), Athens, Greece.
2. *Geographic Routing Protocol for Peer-to-Peer Smart Grid Neighborhood Area Network*, Mouna Rekik, Zied Chtourou, Nathalie Mitton, The 15 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC'2015), Rome, Italy.
3. *A Scalable Geographic Routing Protocol for Virtual Power Plant Communications*, Mouna Rekik, Zied Chtourou, Nathalie Mitton, The 15 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC'2015), Rome, Italy.
4. *Performance and Applicability of a new Geographic Routing Protocol for Virtual Power Plants*, Mouna Rekik, Zied Chtourou, Nathalie Mitton, The 6th International Renewable Energy Congress (IREC'2015), Sousse, Tunisia.

Articles en soumission

1. *GRACO : a geographic GReedy routing with an ACO based void handling technique*, Mouna Rekik, Nathalie Mitton, Zied Chtourou, International Journal of Sensor Networks, Inderscience.
2. *An Efficient Geographic Routing Protocol for Smart Grid Neighborhood Area Network Communications*, Mouna Rekik, Zied Chtourou, Nathalie Mitton, Journal of Modern Power Systems and Clear Energy (MPCE), Springer.
3. *QoS aware routing for real-time and reliable Smart Grid NAN communications*, Mouna Rekik, Nathalie Mitton, Zied Chtourou, International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks (EWSN'2017), Uppsala, Sweden.

Bibliographie

- [1] NIST OpenSG SG-Network Task Force Core Development Team the SG-Network task force. Smart grid networks system requirements specification release version 5 final. *SG-Network task force*, 2012.
- [2] NIST Priority Action Plan. 2-guidelines for assessing wireless standards for smart grid applications. *National Institute of Standards and Technology Std*, 2011.
- [3] Smart Grid Coordination CEN-CENELEC-ETSI. Group smart grid reference architecture. *European Committee for Standardization : Brussels, Belgium*, page 2437, 2012.
- [4] Don Bowen. Tech view : Laying the groundwork for the coming smart grid. [http ://www.research.att.com/](http://www.research.att.com/), février 2010.
- [5] ERDF. Compteurs électriques : ERDF fait sa révolution. Technical report, ERDF, 3 juillet 2008.
- [6] ABB. Les réseaux électriques du futur. Technical report, ABB, 2010.
- [7] Riccardo Petrolo, Valeria Loscrì, and Nathalie Mitton. Towards a smart city based on cloud of things. In *Proceedings of the ACM international workshop on Wireless and mobile technologies for smart cities*, 2014.
- [8] Gimélec. Livre blanc sur les réseaux électriques intelligents - version détaillée. Technical report, Groupement des industries de l'équipement électrique, du contrôle-commande et des services associés, 2011.
- [9] Faycal Bouhafs, Michael Mackay, and Madjid Merabti. Links to the future : Communication requirements and challenges in the smart grid. *IEEE Power and Energy Magazine*, 10(1) :24–32, Jan 2012.
- [10] Ian F Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci. Wireless sensor networks : a survey. *Computer networks*, 38(4) :393–422, 2002.

- [11] Luís M Oliveira and Joel J Rodrigues. Wireless sensor networks : a survey on environmental monitoring. *Journal of communications*, 6(2) :143–151, 2011.
- [12] Hemant Ghayvat, Subhas Mukhopadhyay, Xiang Gui, and Nagender Suryadevara. WSN-and IOT-based smart homes and their extension to smart buildings. *Sensors*, 15(5) :10350–10379, 2015.
- [13] Debdeep Basu, Giovanni Moretti, Gourab Sen Gupta, and Stephen Marsland. Wireless sensor network based smart home : Sensor selection, deployment and monitoring. In *IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, 2013.
- [14] Etimad Fadel, VC Gungor, Laila Nassef, Nadine Akkari, MG Abbas Maik, Suleiman Almasri, and Ian F Akyildiz. A survey on wireless sensor networks for smart grid. *Computer Communications*, 71 :22–33, 2015.
- [15] Yide Liu. Wireless sensor network applications in smart grid : recent trends and challenges. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2012.
- [16] Elliott Kaplan and Christopher Hegarty. *Understanding GPS : principles and applications*. Artech house, 2005.
- [17] Srdjan Čapkun, Maher Hamdi, and Jean-Pierre Hubaux. GPS-free positioning in mobile ad hoc networks. *Cluster Computing*, 5(2) :157–167, 2002.
- [18] Hideaki Takagi and Leonard Kleinrock. Optimal transmission ranges for randomly distributed packet radio terminals. *IEEE Transactions on Communications*, 1984.
- [19] Gregory G. Finn. Routing and addressing problems in large metropolitan-scale internetworks. isi research report. 1987.
- [20] Ting-Chaou. Hou and V.OK Li. Transmission range control in multihop packet radio networks. *IEEE Transactions on Communications*, 1986.
- [21] Evangelos Kranakis, Harvind Singh, and Jorge Urrutia. Compass routing on geometric networks. In *Canadian Conference on Computational Geometry*, 1999.
- [22] Zhen Jiang, Wei Lou Junchao Ma, W. Lou, and Jie Wu. An information model for geographic greedy forwarding in wireless ad-hoc sensor networks. In *Conference on Computer Communications (Infocom)*, 2008.
- [23] Dazhi Chen and Pramod K Varshney. A survey of void handling techniques for geographic routing in wireless networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 9(1) :50–67, 2007.

- [24] Shri Alarmelu V, R Poonkuzhali, and MY Sanavullah. An efficient void handling technique for geographic routing in manet : A survey. *Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, 2(12) :164–170, 2012.
- [25] Sanaz Parvin, Mehdi Agha Sarram, Ghasem Mirjalily, and Fazlollah Adibnia. A survey on void handling techniques for geographic routing in vanet network. *International Journal of Grid & Distributed Computing*, 8(2), 2015.
- [26] Ivan Stojmenovic and Xu Lin. Loop-free hybrid single-path/flooding routing algorithms with guaranteed delivery for wireless networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 12(10) :1023–1032, 2001.
- [27] Rahul Jain, Anuj Puri, and Raja Sengupta. Geographical routing using partial information for wireless ad hoc networks. *IEEE Personal Communications*, 8(1) :48–57, 2001.
- [28] Dazhi Chen and Pramod K Varshney. On-demand geographic forwarding for data delivery in wireless sensor networks. *Computer Communications*, 30(14) :2954–2967, 2007.
- [29] Prosenjit Bose, Pat Morin, Ivan Stojmenović, and Jorge Urrutia. Routing with guaranteed delivery in ad hoc wireless networks. *Wireless networks*, 2001.
- [30] Nicolas Gouvy, Nathalie Mitton, and Jun Zheng. Greedy routing recovery using controlled mobility in wireless sensor networks. In *International Conference on Ad Hoc Networks and Wireless (ADHOC-NOW)*, 2013.
- [31] Nathalie Mitton, Tahiry Razafindralambo, and David Simplot-Ryl. Position-based routing in wireless ad hoc and sensor networks. In *Theoretical Aspects of Distributed Computing in Sensor Networks*. Springer, 2010.
- [32] Hannes Frey and Ivan Stojmenovic. On delivery guarantees of face and combined greedy-face routing in ad hoc and sensor networks. In *Proceedings of the 12th annual International Conference on Mobile computing and networking*. ACM, 2006.
- [33] Prosenjit Bose, Pat Morin, Ivan Stojmenović, and Jorge Urrutia. Routing with guaranteed delivery in ad hoc wireless networks. In *Proceedings of the 3rd International Workshop on Discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communications*, 1999.
- [34] Brad Karp and Hsiang-Tsung Kung. GPSR : Greedy perimeter stateless routing for wireless networks. In *Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, 2000.
- [35] Ming Xu, Yingwen Chen, Yi Wu, and Wanrong Yu. An anti-void geographic routing algorithm for wireless sensor networks. In *Mobile Ad-hoc and Sensor Networks*, pages 60–71. Springer, 2006.

- [36] Fabian Kuhn, Rogert Wattenhofer, Yan Zhang, and Aaron Zollinger. Geometric ad-hoc routing : Of theory and practice. In *Proceedings of the twenty-second annual symposium on Principles of distributed computing*. ACM, 2003.
- [37] Ihor Tsvietkov. A novel method of locating voids in manet structure. In *IEEE First International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology*, 2014.
- [38] Nihel Senouci, Moustafa Kouider El Ouahed, and Hafid Haffaf. Detecting boundary nodes in wsn. In *Proceedings of the International Conference on Wireless Networks (ICWN)*. The Steering Committee of The World Congress in Computer Science, Computer Engineering and Applied Computing (WorldComp), 2014.
- [39] Jianjun Yang, Zongming Fei, and Ju Shen. Hole detection and shape-free representation and double landmarks based geographic routing in wireless sensor networks. *Digital Communications and Networks*, 1(1) :75–83, 2015.
- [40] Xunli Fan and Feifei Du. An efficient bypassing void routing algorithm for wireless sensor network. *Journal of Sensors*, 2015, 2015.
- [41] Dejing Zhang and Enqing Dong. A bypassing void routing combining of geographic and virtual coordinate information for wsn. In *IEEE 22nd International Conference on Telecommunications (ICT)*, 2015.
- [42] Fucai Yu, Shengli Pan, and Guangmin Hu. Hole plastic scheme for geographic routing in wireless sensor networks. In *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2015.
- [43] Zongming Fei, Jianjun Yang, and Hui Lu. Improving routing efficiency through intermediate target based geographic routing. *arXiv preprint arXiv :1502.04316*, 2015.
- [44] Gustavo Weber Denardin, Carlos Henrique Barriquello, Alexandre Campos, and Ricardo Nederson do Prado. A geographic routing hybrid approach for void resolution in wireless sensor networks. *Journal of Systems and Software*, 84(10) :1577–1590, 2011.
- [45] Xin-She Yang, Zhihua Cui, Renbin Xiao, Amir Hossein Gandomi, and Mehmet Karamanoglu. *Swarm intelligence and bio-inspired computation : theory and applications*. Newnes, 2013.
- [46] James Kennedy, James F Kennedy, Russell C Eberhart, and Yuhui Shi. *Swarm intelligence*. Morgan Kaufmann, 2001.
- [47] Marco Dorigo and Gianni Di Caro. Ant colony optimization : a new meta-heuristic. In *Evolutionary Computation, CEC*, 1999.

- [48] Johann Dréo, Alain Pétrowski, Éric D Taillard, and Patrick Siarry. Méta-heuristiques pour l'optimisation difficile. 2003.
- [49] Adamu Murtala Zungeru, Li-Minn Ang, and Kah Phooi Seng. Classical and swarm intelligence based routing protocols for wireless sensor networks : A survey and comparison. *Journal of Network and Computer Applications*, 35(5) :1508–1536, 2012.
- [50] Vasundhara Uchhula and Brijesh Bhatt. Comparison of different ant colony based routing algorithms. *IJCA Special Issue on MANETs*, pages 97–101, 2010.
- [51] Dharmendra Sutariya and Pariza Kamboj. A survey of ant colony based routing algorithms for MANET. *European Scientific Journal*, 9(10), 2014.
- [52] Ru Huang and Guanghui Guanghui. Swarm intelligence-inspired adaptive routing construction in WSN. In *Wireless Communication Networking and Mobile Computing (WiCOM)*, 2010.
- [53] Mesut Günes, Udo Sorges, and Imed Bouazizi. ARA-the ant-colony based routing algorithm for MANETs. In *International Conference Parallel Processing Workshops*, 2002.
- [54] Sudarshan D Shirkande and R. A Vatti. ACO based routing algorithms for ad-hoc network (wsn, manets) : A survey. In *IEEE International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT)*, 2013.
- [55] Yasushi Kambayashi. A review of routing protocols based on ant-like mobile agents. *Algorithms*, 2013.
- [56] Shahab Kamali and Jaroslav Opatrny. Posant : A position based ant colony routing algorithm for mobile ad-hoc networks. In *International Conference Wireless and Mobile Communications (ICWMC)*, 2007.
- [57] Antoine Fraboulet, Guillaume Chelius, and Eric Fleury. Worldsens : Development and prototyping tools for application specific wireless sensors networks. In *The 6th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, 2007.
- [58] Karim Seada, Ahmed Helmy, and Ramesh Govindan. Modeling and analyzing the correctness of geographic face routing under realistic conditions. In *Elsevier Ad Hoc Networks Journal special issue on Recent Advances in Wireless Sensor Networks*, 2007.
- [59] Chia-Hung Lin, Shiao-An Yuan, Shih-Wei Chiu, and Ming-Jer Tsai. Progressface : An algorithm to improve routing efficiency of gpsr-like routing protocols in wireless ad hoc networks. *IEEE Transactions on Computers*, 59(6) :822–834, 2010.

- [60] Hassan Farhangi. The path of the smart grid. *IEEE Power and Energy Magazine*, 8(1) :18–28, 2010.
- [61] Sanjay Goel, Stephen F Bush, David Bakken, et al. *IEEE Vision for Smart Grid Communications : 2030 and Beyond*. IEEE, 2013.
- [62] Edmund Handschin and Alexander Petroianu. *Energy management systems : operation and control of electric energy transmission systems*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [63] Gary Locke and Patrick D Gallagher. NIST framework and roadmap for smart grid interoperability standards, release 1.0. *National Institute of Standards and Technology*, 33, 2010.
- [64] Carles Gomez and Josep Paradells. Wireless home automation networks : A survey of architectures and technologies. *IEEE Communications Magazine*, 48(6) :92–101, 2010.
- [65] Nico Saputro, Kemal Akkaya, and Suleyman Uludag. A survey of routing protocols for smart grid communications. *Computer Networks*, 56(11) :2742–2771, 2012.
- [66] Brett Kilbourne Michael Oldak. NBP RFI : Communications requirements, comments of utilities telecom council. Technical report, Utilities Telecom Council, 2010.
- [67] Ayman I Sabbah, Amr El-Mougy, and Mohamed Ibnkahla. A survey of networking challenges and routing protocols in smart grids. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(1) :210–221, 2014.
- [68] Takuro Sato, Daniel M Kammen, Bin Duan, Martin Macuha, Zhenyu Zhou, Jun Wu, Muhammad Tariq, and Solomon Abebe Asfaw. *Smart Grid Standards : Specifications, Requirements, and Technologies*. John Wiley & Sons, 2015.
- [69] Shafiullah Khan and Jaime Lloret Mauri. *Green Networking and communications : ICT for sustainability*. CRC Press, 2013.
- [70] V Cagri Gungor, Dilan Sahin, Taskin Kocak, Salih Ergut, Concettina Buccella, Carlo Cecati, and Gerhard P Hancke. A survey on smart grid potential applications and communication requirements. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9(1) :28–42, 2013.
- [71] Melike Erol-Kantarci and Hussein T Mouftah. Smart grid forensic science : applications, challenges, and open issues. *IEEE Communications Magazine*, 51(1) :68–74, 2013.
- [72] US DOE. Communications requirements of smart grid technologies. *US Department of Energy, Tech. Rep*, pages 1–69, 2010.

- [73] Francesco Benzi, Norma Anglani, Ezio Bassi, and Lucia Frosini. Electricity smart meters interfacing the households. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 58(10) :4487–4494, 2011.
- [74] Brandon Davito, Humayun Tai, and Robert Uhlaner. The smart grid and the promise of demand-side management. *McKinsey on Smart Grid*, pages 38–44, 2010.
- [75] Weixiao Meng, Ruofei Ma, and Hsiao-Hwa Chen. Smart grid neighborhood area networks : a survey. *IEEE Network*, 28(1) :24–32, 2014.
- [76] Danny Pudjianto, Charlotte Ramsay, and Goran Strbac. Virtual power plant and system integration of distributed energy resources. *Renewable power generation, IET*, 1(1) :10–16, 2007.
- [77] Melike Erol-Kantarci and Hussein T Mouftah. Wireless multimedia sensor and actor networks for the next generation power grid. *Ad Hoc Networks*, 9(4) :542–551, 2011.
- [78] Ramona Marfievici, Amy L Murphy, Gian Pietro Picco, Federico Ossi, and Francesca Cagnacci. How environmental factors impact outdoor wireless sensor networks : a case study. In *IEEE 10th International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems (MASS)*, 2013.
- [79] Bernard Fong, Predrag B Rapajic, Guan Yue Hong, and Alvis Cheuk M Fong. Factors causing uncertainties in outdoor wireless wearable communications. *IEEE Pervasive Computing*, 2(2) :16–19, 2003.
- [80] Melike Erol-Kantarci and Hussein T Mouftah. Energy-efficient information and communication infrastructures in the smart grid : A survey on interactions and open issues. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(1) :179–197, 2015.
- [81] commission de régulation de l’énergie. La communication (ericsson). <http://www.http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=technologies-communication.fr/>, 2016.
- [82] Stephen Dawson-Haggerty, Arsalan Tavakoli, and David Culler. Hydro : A hybrid routing protocol for low-power and lossy networks. In *The First IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, 2010.
- [83] Rosario G Garroppo, Stefano Giordano, and Luca Tavanti. Implementation frameworks for IEEE 802.11 s systems. *Computer Communications*, 33(3) :336–349, 2010.
- [84] RPL : Ipv6 routing protocol for low power and lossy networks. <http://tools.ietf.org/id/draft-ietf-roll-rpl-19.html>, March 2011.

- [85] Ji-Sun Jung, Keun-Woo Lim, Jae-Beom Kim, Young-Bae Ko, Younghyun Kim, and Sang-Yeom Lee. Improving IEEE 802.11 s wireless mesh networks for reliable routing in the smart grid infrastructure. In *IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*, 2011.
- [86] Gurkan Tuna, Vehbi Cagri Gungor, and Kayhan Gulez. Wireless sensor networks for smart grid applications : a case study on link reliability and node lifetime evaluations in power distribution systems. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013, 2013.
- [87] Daniel Popa, Jorjeta Jetcheva, Nicolas Dejean, Ruben Salazar, J Hui, and Kazuya Monden. Applicability statement for the routing protocol for low power and lossy networks (rpl) in ami networks. Technical report, Internet draft, 2011.
- [88] Di Wang, Zhifeng Tao, Jinyun Zhang, and Alhussein A Abouzeid. RPL based routing for advanced metering infrastructure in smart grid. In *IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*, 2010.
- [89] Emilio Ancillotti, Raffaele Bruno, and Marco Conti. The role of the rpl routing protocol for smart grid communications. *Communications Magazine, IEEE*, 51(1) :75–83, 2013.
- [90] Gowdemy Rajalingham, Yue Gao, Quang-Dung Ho, and Tho Le-Ngoc. Quality of service differentiation for smart grid neighbor area networks through multiple RPL instances. In *Proceedings of the 10th ACM Symposium on QoS and Security for Wireless and Mobile Networks*, 2014.
- [91] Preetha Thulasiraman. RPL routing for multigateway AMI networks under interference constraints. In *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2013.
- [92] Adnan Aijaz, Hongjia Su, and Abdol-Hamid Aghvami. CORPL : A routing protocol for cognitive radio enabled ami networks. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(1) :477–485, 2015.
- [93] Mauro Biagi and Lutz Lampe. Location assisted routing techniques for power line communication in smart grids. In *The First IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, 2010.
- [94] Marc Heissenbüttel, Torsten Braun, Thomas Bernoulli, and Markus WäLchli. Blr : beacon-less routing algorithm for mobile ad hoc networks. *Computer communications*, 27(11) :1076–1086, 2004.
- [95] Luke Demoracski. Fault-tolerant beacon vector routing for mobile ad hoc networks. In *Proceedings of the 19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium*, 2005.

- [96] Brain M. Blum, Tian He, Sang Son, and John A. Stankovic. IGF : A state-free robust communication protocol for wireless sensor networks. *Tec. Report Depart. Comput. Sci. Univ. Virginia*, 2003.
- [97] Quang-Dung Ho, Gowdemy Rajalingham, and Tho Le-Ngoc. Geographic-based routing in smart grid's neighbor area networks. *REV-JEC (ISSN : 1859-378X)*, 3(3-4), 2014.
- [98] Loven Kalyan and Karamjit Kaur. Routing protocols for neighbor area network of SGCN a review. *International Journal of Research*, 2(3) :535–538, 2015.
- [99] Quang-Dung Ho, Gowdemy Rajalingham, and Tho Le-Ngoc. Performance and applicability of geographic-based routing in smart grid's neighbor area networks. In *IEEE International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*, 2013.
- [100] Quang-Dung Ho, Yue Gao, Gowdemy Rajalingham, and Tho Le-Ngoc. Performance and applicability of candidate routing protocols for smart grid's wireless mesh neighbor area networks. In *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2014.
- [101] Quang-Dung Ho, Yue Gao, Gowdemy Rajalingham, and Tho Le-Ngoc. *Wireless Communications Networks for the Smart Grid*. Springer, 2014.
- [102] Anth  a Mayzaud, Anuj Sehgal, Rémi Badonnel, and Isabelle Chrisment. Gestion de risques appliquée aux réseaux RPL. In *9  me Conférence sur la Sécurité des Architectures Réseaux et des Systèmes d'Information*, 2014.
- [103] Tim Winter. RPL : Ipv6 routing protocol for low-power and lossy networks. 2012.
- [104] Bilel Romdhani. *Exploitation de l'hétérogénité des réseaux de capteurs et d'actionneurs dans la conception des protocoles d'auto-organisation et de routage*. PhD thesis, INSA de Lyon, 2012.
- [105] Gopalakrishnan Iyer, Prathima Agrawal, Emmanuel Monnerie, and Ruben Salazar Cardozo. Performance analysis of wireless mesh routing protocols for smart utility networks. In *IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, 2011.
- [106] Zubair Md Fadlullah, Mostafa M Fouda, Nei Kato, Akira Takeuchi, Noboru Iwasaki, and Yousuke Nozaki. Toward intelligent machine-to-machine communications in smart grid. *Communications Magazine, IEEE*, 49(4) :60–65, 2011.
- [107] Siok Kheng Tan, Mahesh Sooriyabandara, and Zhong Fan. M2M communications in the smart grid : Applications, standards, enabling technologies, and research challenges. *International Journal of Digital Multimedia Broadcasting*, 2011.

- [108] Simon Fey, Pascal Benoit, Gregor Rohbogner, Andreas H Christ, and Christof Wittwer. Device-to-device communication for smart grid devices. In *The 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe)*, 2012.
- [109] WSNNet simulator. <http://wsnet.gforge.inria.fr/>.
- [110] Andrea Goldsmith. *Wireless communications*. Cambridge university press, 2005.
- [111] Ahmad Abed Alhameed Alkhatib and Gurvinder Singh Baicher. Wireless sensor network architecture. In *International conference on computer networks and communication systems (CNCS) IPCSIT*, 2012.
- [112] Melike Yigit, Eyup Alper Yoney, and V. Cagri Gungor. Performance of mac protocols for wireless sensor networks in harsh smart grid environment. In *IEEE First International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, 2013.
- [113] Vojislav B. Misic and Jelena Misic. *Machine-to-machine communications : architectures, technology, standards, and applications*. CRC Press, Boca Raton, 2015.
- [114] Marina Thottan Kenneth C. Budka, Jayant G. Deshpande. *Communication Networks for Smart Grids Making Smart Grid Real*. Imprint Springer, London, 2014.
- [115] Jayant G Deshpande, Eunyoung Kim, and Marina Thottan. Differentiated services qos in smart grid communication networks. *Bell Labs Technical Journal*, 16(3) :61–81, 2011.
- [116] Kenneth C Budka, Jayant G Deshpande, Tewfik L Doumi, Mark Madden, and Tim Mew. Communication network architecture and design principles for smart grids. *Bell Labs Technical Journal*, 15(2) :205–227, 2010.
- [117] Cédric Adjih, Emmanuel Baccelli, Eric Fleury, Gaetan Harter, Nathalie Mitton, Thomas Noel, Roger Pissard-Gibollet, Frédéric Saint-Marcel, Guillaume Schreiner, Julien Vandaele, et al. Fit iot-lab : A large scale open experimental iot testbed. In *Proceedings of the 2nd IEEE World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, 2015.
- [118] ERDF. ERDF poursuit sa modernisation en renforçant sa présence dans le développement des CPL 3ème génération. *COMMUNIQUE DE PRESSE*, 17 octobre 2008.
- [119] ERDF. Courant porteur en ligne « nouvelle génération » ERDF va présider l’alliance CPL G3 . *COMMUNIQUE DE PRESSE*, 4 octobre 2011.
- [120] Smart Grid Interoperability Panel Cyber Security Working Group. Introduction to NISTIR 7628 guidelines for smart grid cyber security. *NIST Special Publication*, 2010.

Table des matières

Résumé	iv
Acronymes	vii
Sommaire	xi
Liste des tableaux	xiii
Table des figures	xv
Introduction	3
Contexte	3
Thèse	5
Structure de la thèse	6
Notations, modèles et hypothèses	7
 I Routage géographique avec garantie de livraison dans les réseaux de capteurs sans fil	 9
État de l'art : Routage Géographique	13
Le routage géographique	13
Mécanismes de récupération	16
Conclusion	20
 GRACO	 23
Motivation	23
Optimisation par colonie de fourmis	24
GRACO	26

Mode glouton : <i>Ph-assisted greedy forwarding</i>	26
Mode de récupération : <i>ACO based Recovery</i>	28
Multiples récupérations pour la même destination	37
Gestion des boucles	37
Évaluation des performances	39
Coût de livraison	43
Longueur des routes	45
Délai de bout-en-bout	48
Taux de livraison	48
Discussion sur l'utilisation de mémoire	51
Conclusion	52

II Routage géographique dans les réseaux de capteurs et actionneurs sans fil dans les smart grids 55

Smart Grids : Les réseaux électriques intelligents 59	59
Réseau d'électricité conventionnel	59
Réseau d'électricité intelligent : le smart grid	62
Architecture du Smart Grid	63
Réseaux de communication du Smart Grid	66
Les réseaux domestiques (Home Area Networks (HAN))	67
Les réseaux de voisinage (Neighborhood Area Network (NAN))	69
Le réseau étendu : Wide Area Network (WAN)	71
Les nouvelles applications introduites par Smart Grid	72
Les applications de l'infrastructure de comptage évolué	72
La gestion active de la demande	73
La gestion distribuée du réseau électrique	74
Transport électrique	74
Production et Stockage distribués de l'électricité (DERs)	75
Monitoring à grande échelle des conditions du réseau	76
Conclusion	76
Évaluation de GRACO dans NAN 79	79
Exigences de la communication pour les NANs	79
Schémas de communication	79
Passage à l'échelle	83
Auto-guérison	83
Utilisation des ressources	85
Sécurité et confidentialité	86
Qualités de Service (QoS)	87

Articles en soumission	155
Routage dans les réseaux NAN	88
Le protocole RPL	90
GPSR	91
Discussion	93
Évaluation des performances de GRACO dans le contexte du SG-NAN	94
Topologie et scénarios de déploiement (recommandation de NIST)	95
Modèle du canal	96
Couche physique (PHY) et Couche MAC	97
Résultats des simulations et Discussion	98
Conclusion	102
QoS-GRACO	105
Exigences en QoS des applications du NAN	105
Modélisation du trafic du NAN	106
Niveaux de Priorité du trafic	109
Exigences en termes des délais de transmission des données . . .	111
Exigences en termes de fiabilité de transmission des données . .	113
QoS-GRACO	115
Modèle de QoS	115
Mode glouton : QoS aware ph-assisted greedy forwarding	118
Mode de récupération : QoS aware ACO based recovery	120
Simulations et résultats	123
Coût de livraison	123
Délai de bout-en-bout	127
Taux de livraison	127
Conclusion	130
Conclusion et Perspectives	135
Conclusion	135
Perspectives	137
Liste des publications	141
Bibliographie	143
Table des matières	153

ROUTAGE GÉOGRAPHIQUE MULTI-CHEMIN BASÉ SUR L'INTELLIGENCE D'ESSAIM POUR RÉSEAUX DE CAPTEURS ET D'ACTIONNEURS SANS FIL : APPLICATION AUX SMART GRIDS

Résumé

Le concept de Smart Grid devrait jouer un rôle primordial dans la quête d'une meilleure gestion de l'énergie électrique dans un contexte énergétique mondial de plus en plus critique. En rassemblant les ressources connectées au réseau électrique conventionnel et une infrastructure de communication, le Smart Grid permet une gestion intelligente de l'énergie électrique. La mise en œuvre des Smart Grids devrait engendrer la mise en place d'une infrastructure de communication permettant l'échange des données entre les différentes entités connectées à ces réseaux. Cette thèse se positionne dans le contexte des réseaux de capteurs et d'actionneurs sans fils appliqués dans les réseaux d'électricité intelligents. A travers cette thèse, nous avons proposé un protocole de routage des données sur le réseau de communication au niveau réseau de distribution. Dans un premier temps, nous avons proposé un nouveau protocole de routage géographique basé sur l'intelligence d'essaim pour les réseaux de capteurs et d'actionneurs sans fil. Le protocole utilise le routage géographique comme mécanisme principal de routage de données, et utilise un mécanisme basé sur l'optimisation par colonies de fourmis pour contourner les vides de communication et créer du multi-chemin autour de ces zones vides. Les performances du protocole ont été validées à travers des simulations. En comparant les résultats à l'état de l'art, le protocole proposé permet d'améliorer les performances du réseau en termes de taux de livraison des données, temps de réception des données et coût de livraison. Dans un second temps, nous avons proposé l'utilisation du protocole proposé comme protocole de routage dans les réseaux de voisinages (NAN) sans fil du Smart Grid. Le protocole proposé permet d'assurer tous les types de paradigme de communication, en particulier la communication Point-à-Point tout en offrant une évolutivité et des capacités d'auto-guérison. La faisabilité et l'applicabilité du protocole dans les NANs a été confirmée à travers des simulations, en utilisant des paramètres définis par le NIST (National Institute of Standards and Technology), pour valider les solutions proposées pour le Smart Grid. Enfin, dans un troisième temps, nous nous sommes concentrés sur les qualités de service (QoS) requises par les applications et services utilisant le NAN. Nous avons, ainsi, ajouté un modèle de QoS au protocole de routage proposé pour tenir compte de ces exigences. Les performances du nouveau protocole ont été validées à travers des simulations. Les résultats ont montré que le protocole permet de satisfaire les exigences les plus contraintes en termes de fiabilité et de délai de réception des données.

Mots clés : réseaux de capteurs et d'actionneurs sans fil, smart grid, neighborhood area network, protocole de routage, routage géographique, optimisation par colonies de fourmis

GEOGRAPHICAL MULTIPATH ROUTING BASED ON SWARM INTELLIGENCE FOR WIRELESS SENSORS AND ACTUATORS NETWORKS: APPLICATION TO SMART GRIDS

Abstract

The Smart Grid concept should play a key role in the quest for better management of electrical energy in the global energy situation increasingly critical. By bringing together the resources connected to the conventional power grid and communications infrastructure, the Smart Grid enables intelligent management of electrical energy. The implementation of Smart Grids should lead the implementation of a communication infrastructure for data exchange between the various entities connected to these networks. This thesis is positioned in the context of wireless sensors and actuators networks in smart grids. Through this work, we have proposed a data routing protocol for the communication network to the distribution network level. First, we proposed a new geographical routing protocol based on swarm intelligence for wireless sensors and actuators networks. The protocol uses the geographic routing as a main data routing mechanism, and uses a recovery mechanism based on ant colony optimization to bypass communication voids and to create multi-way around these voids. The protocol performance was validated through simulations. By comparing the results to the state of the art, the proposed protocol improve network performances in terms of data delivery rate, end-to-end delay and delivery cost. Secondly, we proposed the use of the protocol proposed as the routing protocol in wireless neighborhood area networks (NANs) Smart Grid. The proposed protocol ensures all communication paradigm types, especially Point-to-Point communication while providing scalability and self-healing capabilities. The feasibility and applicability of the protocol in NANs was confirmed through simulations using parameters defined by NIST (National Institute of Standards and Technology) to validate the proposed solutions for the smart grid. Finally, we focused on the qualities of service (QoS) required by applications and services using NAN. We have thus added a QoS model to the proposed routing protocol to take account of NAN's communication requirements. The performance of the new protocol was validated through simulations. The results showed that the protocol can satisfy the most severe requirements in terms of reliability and end-to-end delay.

Keywords: wireless sensor and actuator network, smart grid, neighborhood area network, routing protocol, geographic routing, ant colony optimization
